ELETRÔNICA RÁDIO E TV

SUMÁRIO

INSTITUTO UNIVERSAL BRASILEIRO

CURSO DE ELETRÔNICA BÁSICA RÁDIO - TV
9ª LIÇÃO TEÓRICA
AMPLIFICAÇÃO DE PEQUENOS SINAIS DE ÁUDIO E CLASSES DE AMPLIFICAÇÃO

Introdução

Em eletrônica, sempre há a necessidade de aumentarmos um sinal. Esse aumento é o que se chama de **amplificação**, e o dispositivo ou circuito que executa a amplificação é chamado de **amplificador**. Quando se fala diante de um microfone, por exemplo (que é um dispositivo que transforma os sons em ondas elétricas), e se ligam os fios do microfone diretamente nos fios de um alto-falante (dispositivo inverso do microfone, ou seja, transforma as ondas elétricas em sons), neste último nada seria reproduzido, porque a onda gerada no microfone não tem energia suficiente para movimentar o cone do alto-falante. Então, há a necessidade de intercalar entre o microfone e o alto-falante um **amplificador**.

> **O amplificador de áudio tem a função de elevar o nível do sinal proveniente do microfone, até que ele tenha potência suficiente para movimentar o cone do alto-falante.**

São inúmeras as aplicações do amplificador, na prática. Veremos, por exemplo, que, em um receptor de rádio, a onda recolhida na antena passa por várias amplificações, antes de se transformar em som.

Os transistores são utilizados como amplificadores em receptores de rádio, de televisão, nos gravadores, reprodutores de som de alta-fidelidade, etc.

Nesta lição apresentamos os transistores como amplificadores de áudio de baixo nível, isto é, como amplificadores de sinais de som de amplitude pequena, amplificadores esses que precedem os amplificadores de potência.

> Os amplificadores de baixo nível costumam ser chamados de **pré-amplificadores** ou **excitadores.**

I - Tipos de amplificação

Até aqui, temos nos referido somente à amplificação de tensão, que admitimos fosse produzida por um gerador senoidal. Na realidade, esse gerador pode ser um microfone, um fonocaptador (cápsula leitora de discos), uma onda de rádio, de TV, etc. São possíveis três tipos de amplificações, a saber:

> 1 - amplificação de tensão contínua;
> 2 - amplificação de tensão variável;
> 3 - amplificação de potência.

1 - Amplificação de tensão contínua

A amplificação de tensão contínua consiste em amplificar a variação que essa tensão sofre, quando muda de valor. É um tipo de amplificação que tem aplicação, por exemplo, nos instrumentos conhecidos como voltímetro eletrônico. Graduando a tensão de saída em função do ganho, podemos aplicar o amplificador como medidor de tensão contínua. Por exemplo, suponhamos que temos um amplificador de ganho igual a 10. Então, se aplicarmos 1 volt no amplificador, o voltímetro acusará uma variação de 10 volts; se aplicarmos 0,3V o voltímetro marcará 3 volts de variação, etc. Logo, calibrando o voltímetro (no caso seria variação dividida por 10), podemos ler diretamente a tensão desconhecida.

2 - Amplificação de tensão variável

Quando o transistor é usado para amplificar a tensão de baixo nível, dizemos que há **amplificação de tensão**. Esses sinais geralmente provêm de microfones, fonocaptadores, câmeras de televisão, etc., e devem ter sua tensão elevada, para que possam excitar o amplificador de potência.

3 - Amplificação de potência

Muitas vezes, necessita-se de potência elevada na saída do amplificador. Neste caso, devemos elevar tanto a tensão como a corrente. Teremos, então, a **amplificação de potência**. Os receptores de rádio, amplificadores de som, estágio de saída de transmissores, saída de vídeo de televisores etc., que serão estudados no decorrer de nosso curso, necessitam de amplificação de potência na carga. Podemos dizer, portanto, que:

> "O amplificador de potência é aquele que transfere à carga a potência requerida por esta última."

A rigor, não há diferença de princípio de funcionamento entre os tipos de amplificação citados. A diferença está na grandeza elétrica que se deseja recolher. Se for tensão, o amplificador será de tensão; se for potência, o amplificador será de potência.

Quase sempre o amplificador de tensão é o excitador do amplificador de potência. Vamos dar um exemplo: temos um salão de baile para o qual se necessita de 50 W de som para difundir a música ou a voz, por todo o salão. Escolhemos um amplificador de som que necessita de 10 volts na base do transistor para libertar a potência requerida. Mas o microfone, e também o "pick-up", só fornecem 0,01 V na saída. Ora, é fácil imaginar que, se ligarmos o microfone ou o "pick-up" na entrada do amplificador, não se ouvirá som algum, no alto-falante, porque a tensão de entrada (tensão do sinal) é muito pequena. Devemos, então, intercalar, entre o microfone e o amplificador de potência, um amplificador de tensão. Esse amplificador deverá ter ganho de $10 \div 0{,}01 = 1000$, para produzir plena potência sonora.

II - Porque o transistor amplifica

Sabemos que o transistor é um dispositivo formado por três camadas de semicondutores, ou seja,uma N e duas P, ou uma P e duas N. Na **figura 1**, representamos um transistor **NPN** do tipo conhecido como **transistor de junção**. Em **a**, ilustramos o aspecto construtivo (ampliado) e, em **b**, a representação de bloco que facilita a compreensão de seu funcionamento. A região N, menor, representada à esquerda na figura 1a, é o emissor; a região P, central, é a base e a N, maior, à direita, é o coletor. Na figura 1b, as duas regiões N são representadas com o mesmo tamanho, apenas por se tratar de um esquema.

O transistor NPN, para funcionar normalmente, deve ser polarizado como mostramos na **figura 2**, ou seja, o emissor é negativo em relação à base (sentido direto) e o coletor é positivo em relação à base (sentido inverso). Naturalmente, se o transistor for do tipo PNP, as polaridades deverão ser trocadas. Polarizado dessa maneira, as correntes nas junções NP e PN estabelecem-se da seguinte maneira:

a) Os elétrons fluem do emissor para a base, porque essa junção está polarizada no sentido direto. Na base, há recombinação de elétrons e lacunas, mas,

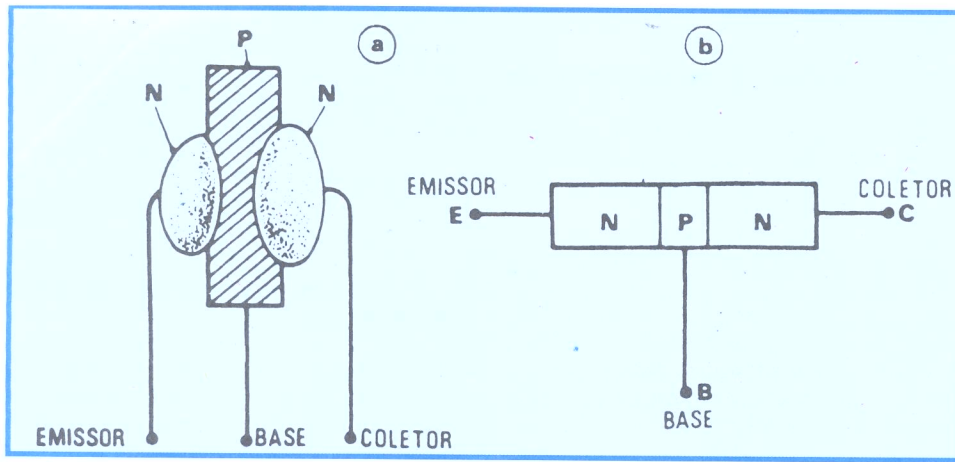



Figura 1 -Transistor NPN-Construção e representação em bloco.

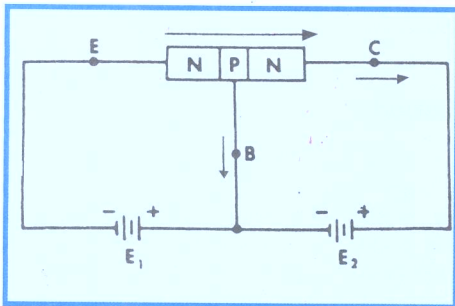



Figura 2 - Polarização de um transistor NPN(sentido **real** da corrente).

como ela é muito estreita, uma pequena quantidade de elétrons atinge o pólo positivo, formando o que se chama de **corrente de base**.

b) Entre base e coletor não há fluxo de elétrons (corrente elétrica), porque a junção PN está polarizada no sentido inverso.

c) Da região N do emissor para a região N do coletor flui a corrente mais importante do transitor, que é chamada de **corrente de coletor**. Isto acontece porque os elétrons do emissor são atraídos pela bateria E_2 e os elétrons da região do coletor, além de serem atraídos por essa bateria, são também **repelidos** pela bateria E_1, pois, como se pode verificar pela figura 2, as baterias E_1 e E_2 estão ligadas em série entre os pontos E e C.

A corrente de coletor pode ser controlada pela polarização da base.

De fato, suponhamos que a base fique negativa em relação ao emissor, no transistor mostrado na figura 2. Isto significa inverter a polaridade da bateria E_1. Então, a junção NP emissor-base fica polarizada no sentido inverso e não haverá corrente de base, porque, sendo negativa a base, ela fica com excesso de elétrons e, como a corrente majoritária, no transistor NPN, é constituída pelo movimento de elétrons, resulta que os elétrons da corrente de emissor são repelidos pelos elétrons da base e não conseguirão passar para a região do coletor.

Agora, se fizermos o inverso do exposto, ou seja, se polarizarmos normalmente a base, e aumentarmos progressivamente a tensão, iremos observar que a corrente de coletor também aumenta. A explicação do fato é bastante simples. Basta lembrar que a base, ficando mais positiva, arrasta mais elétrons do emissor, obrigando maior número deles a atravessar a região do coletor.

Ora do que acima expusemos, pode-se concluir que a corrente emissor-coletor pode ser controlada pela ação da corrente emissor-base. Além disso, uma pequena variação na corrente de base provoca variação bem maior da corrente de coletor. **Então, é possível aplicar um sinal pequeno na base e recolhê-lo bem maior no coletor**, o que significa que o transistor é um dispositivo **amplificador**.

Obs.: A análise feita considera o sentido **real** da corrente.

III - Modos de ligar um transistor

Sendo o transistor um dispositivo de três terminais, podemos ligá-lo de seis modos (também ditos configurações) diferentes. Dessas, as **três mais** importantes do ponto de vista prático são:

a) Base comum ou base à massa

Neste tipo de ligação, mostrado na **figura 3**, o sinal é introduzido nos terminais emissor-base e recolhido nos terminais coletor-base. Como se nota, o terminal da base é comum tanto ao sinal de entrada como ao de saída, justificando-se daí o nome de **base-comum,** dado ao circuito.

As principais propriedades desse tipo de ligação são:

1 - Baixa resistência de entrada

Por **resistência de entrada** devemos entender a **relação entre a tensão e a corrente de entrada** que, no caso, seria a tensão entre a base e o emissor, e a corrente de emissor. Como essa tensão é baixa e a corrente relativamente alta, resulta resistência de entrada de baixo valor. Concluímos, também, que a resistência deve ser baixa, observando que a junção emissor-base está polarizada no sentido direto, isto é, no sentido que favorece a passagem da corrente e que, naturalmente, deve ser o de menor resistência.

2 - Resistência de saída elevada

Definiremos a **resistência de saída** como a **relação entre a tensão de saída e a corrente de saída**. No caso, é a relação entre a tensão e a corrente do coletor. Como a junção coletor-base está polarizada no sentido inverso, é fácil concluir que a resistência de saída deve ser alta.

3 - Ganho de corrente menor que a unidade

O ganho de corrente contínua do transistor ligado na configuração base comum costuma ser representado pela letra grega α (lê - se: alfa). Ele representa a relação entre a corrente no circuito de saída e aquela no de entrada. No caso em análise, será a relação (divisão) entre a corrente do coletor e a do emissor, ou seja:

$$\alpha = \frac{I_c}{I_e}$$

Figura 3 -Configuração base-comum.

Considerando-se que a corrente de coletor é ligeiramente menor que a corrente de emissor, o ganho de corrente será menor que **um**, já que a divisão de um número por outro maior do que ele sempre dá como resultado um número menor que um. De um modo geral, o ganho de corrente na ligação base comum está entre 0,95 a 0,99.

4 - Não há inversão de fase

Isto quer dizer que a forma de onda aplicada na entrada terá o mesmo aspecto na saída. Podemos chegar a essa conclusão, observando o seguinte:

Suponhamos que o nosso gerador da figura 3 tenha a forma de onda senoidal, representada à direita, na mesma figura. Quando a tensão do gerador varia de A a B, ou seja, passa do zero ao máximo positivo, a tensão total aplicada à junção emissor-base **diminui**, porque o gerador e a bateria ficam em oposição, ou seja, o pólo negativo da bateria ligado ao negativo do gerador. Diminuindo a tensão na base, fica também diminuída a corrente no coletor, como já analisamos nesta lição. Então, a queda de tensão no **resistor de carga**, que designamos por RL, diminui e a resultante da soma da tensão da bateria de coletor com a queda no resistor RL aumenta. Isto significa que a tensão retirada entre a base e o coletor, através do capacitor C, aumenta. Então, a variação positiva da forma de onda, na entrada, produz variação positiva também na saída, o que quer dizer que nesse trecho a forma de onda varia no mesmo sentido, **não havendo inversão de fase**.

Naturalmente, no trecho CD da tensão na entrada, tudo se passa do mesmo modo, com a diferença de que há mudança de sentido tanto na entrada, como na saída, como se pode deduzir facilmente, com o mesmo raciocínio empregado acima.

b) Coletor comum ou coletor à massa

O circuito, na configuração coletor comum, está mostrado na **figura 4.** Como o aluno pode observar, a entrada do sinal é efetuada na junção base-coletor e a saída, na junção emissor-coletor, sendo, portanto, comum aos dois circuitos o terminal de coletor.

As principais características desse tipo de ligação são as seguintes:

1 - Alta resistência de entrada

De fato, o sinal, sendo aplicado na junção base-coletor, encontrará alta resistência, pois sabemos que essa junção esta polarizada no sentido inverso.

2 - Baixa resistência de saída

A corrente do transistor flui quase totalmente entre o emissor e o coletor; logo, esse é o caminho de menor resistência.

3 - Ganho de corrente elevado

O ganho de corrente é definido como a relação entre a corrente de saída e a de entrada. Ora, a corrente de saída, no caso, é a de coletor-emissor e a de entrada é a de base-coletor. Como a corrente de base é muitíssimo menor que a de coletor, resulta que a divisão desta última pela primeira dará um número bem maior do que a unidade, ou seja, o **ganho de corrente é elevado**. Neste caso, o ganho costuma ser representado pela letra ß (lê-se: beta).

$$ß = \frac{IC}{IB}$$

4 - Não há inversão de fase

De fato, quando o sinal na entrada varia de A a B, isto é, de zero ao máximo positivo da onda senoidal aplicada na base, a corrente de base aumenta, porque o gerador fica em série com a bateria de polarização, como se pode verificar pela figura 4. Em conseqüência, a corrente de coletor também aumenta, o que provoca maior queda de potencial no resistor de carga RL.

Mas, observando o sentido da corrente na figura 4, verifica-se que, quando a corrente aumenta, o terminal de RL ligado à bateria E_2 fica mais positivo; portanto, a queda de tensão fica em série com a bateria e aumenta a tensão resultante na saída. Isto significa que a tensão de saída acompanha **no sentido** as variações da tensão de entrada, ou seja, **não há inversão de fase**.

Com raciocínio análogo, podemos concluir que no trecho CD, quando a tensão de entrada diminuir de valor, a de saída também diminuirá.

c) Emissor comum ou emissor à massa

Este tipo de ligação está mostrado na **figura 5**. Como se pode observar, o sinal de entrada é introduzido entre a base e o emissor, e o de saída é retirado entre o coletor e o emissor. Esse tipo de circuito é o que mais se usa, na prática. Suas principais qualidades são:

1 - Média resistência de entrada

A junção base-emissor está polarizada no sentido direto e sua resistência tem valor relativamente baixo. Essa resistência, entretanto, é maior do que no caso da ligação em base comum e menor do que na ligação em coletor comum; portanto, diz-se que essa montagem tem **média** resistência de entrada.

2 - Média resistência de saída

Também, pelo fato da resistência de saída da montagem emissor comum

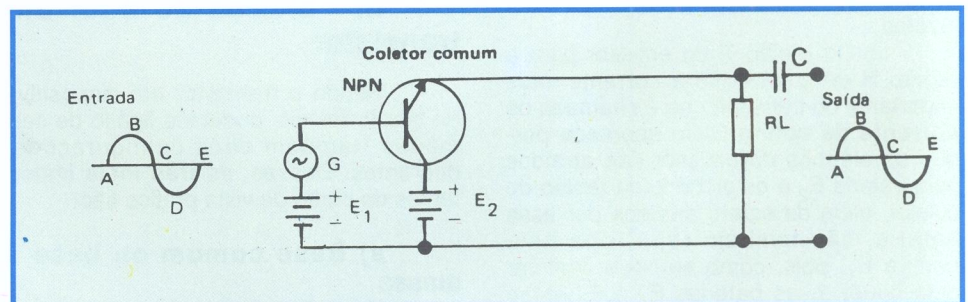



Figura 4 - Configuração coletor-comum.

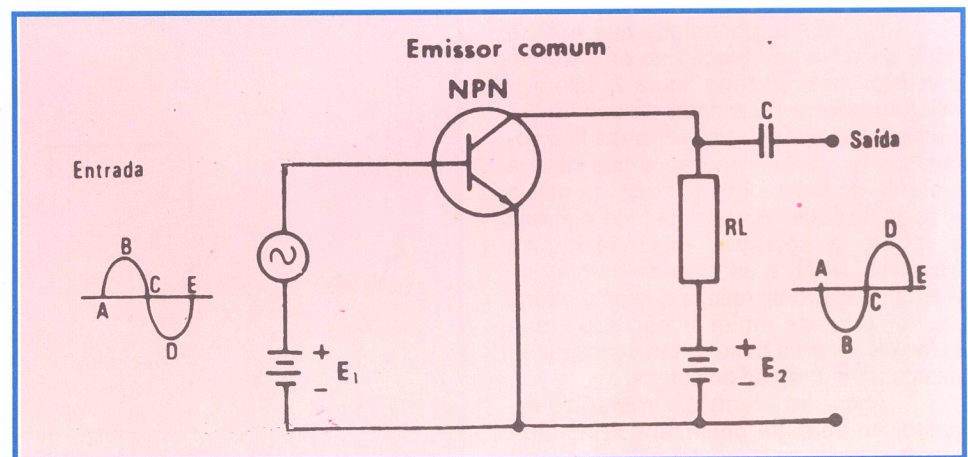



Figura 5 - Configuração emissor-comum.

ser menor do que no caso da montagem em base comum e maior do que na montagem coletor comum, diz-se que ela é média.

3 - Elevado ganho de corrente

Nessa montagem, o ganho de corrente é a relação entre a corrente de coletor e a de base, e costuma ser representado por ß (lê-se: beta) ou h_{FE} Como a corrente de coletor é muito maior que a de base, resulta que o ganho de corrente tem valor elevado.

4 - Há inversão de fase

Das três montagens que apresentamos, esta é a única em que há **inversão de fase**, isto é, a forma de onda do sinal de entrada aparece modificada, no tempo, na saída. Vejamos porque:

Suponhamos que o sinal de entrada varie de A a B (fig. 5), isto é, passe do zero ao máximo valor positivo. Nessas circunstâncias, a bateria E_1 e o sinal do gerador ficam em série, suas tensões se somam e, conseqüentemente a corrente de base aumenta, o que provoca o aumento da corrente de coletor. Esse aumento na corrente de coletor produz maior queda de tensão no resistor RL. Em razão do sentido da corrente, essa queda no resistor RL fica em oposição com a bateria E_2 (bateria do coletor) e a tensão resultante diminui. Então, quando o sinal de entrada varia no sentido positivo, o de saída varia no negativo; logo, **há inversão do sinal** de um ângulo de 180°.

Com o mesmo raciocínio, podemos concluir que, quando o sinal de entrada varia de C a D, ou seja, do zero ao máximo negativo, o sinal de saída sofre variação de C' a D', isto é, passa do zero ao máximo positivo.

IV - Características do transistor

a) Quanto ao modo de operação

O transistor é um dispositivo compacto, cujos terminais não são isolados entre si. Em razão disso, pelo seu terminal de controle, que é a base, sempre circula corrente, em funcionamento normal. A variação da corrente de base é que provoca variação da corrente de coletor. Por essa razão, diz-se que o **transistor é um dispositivo controlado por corrente**.

b) Quanto às resistências de entrada e saída

Os transistores têm resistência de entrada relativamente baixa, como vimos no parágrafo anterior. O transistor apresenta resistência de saída com valor médio.

Observações:

1ª) Nestas descrições, estamos considerando o transistor na configuração de emissor à massa. Nas outras configurações, as resistências de entrada e saída, do transistor, mudam, como já vimos.

2ª) Até aqui temos citado resistências de entrada e saída, mas, de um modo geral, não se trata de resistência pura e, sim, de impedância.

Do que foi exposto para os três tipos de configurações básicas de transistores, podemos, resumidamente, criar a tabela I que contém todos os dados já mencionados, a fim de que o aluno possa relacionar a diferença entre os três tipos de montagens.

TABELA I

CONFIGURAÇÃO	CARACTERÍSTICAS				
	Ganho de corrente	Ganho de tensão	Resistência de entrada	Resistência de saída	inversão de fase
Base-comum	menor que um (< 1)	elevado	baixa	elevada	Não há inversão
Coletor-comum	elevado	menor ou igual a 1(≤ 1)	elevada	baixa	Não há inversão
Emissor-comum	elevado	elevado	média	média	há inversão

V - Polarização do transistor

Por **polarização** de um transistor devemos entender a ligação de fontes de corrente contínua aos seus terminais, com polaridades corretas, de modo que o transistor funcione normalmente. Assim, as duas baterias que mostramos nas figuras 2, 3, 4 e 5 são baterias de polarização. A bateria E_1 determina a corrente de base e a bateria E_2 determina a tensão de coletor e a corrente de emissor. Essas três grandezas fixam o **ponto de funcionamento, ponto de repouso** ou **ponto quiescente**, do transistor.

Tipos de polarização

É possível utilizar uma única bateria para polarizar o coletor e a base do transistor.

Os métodos de polarização de transistores mais comuns e com os quais o aluno se defrontará freqüentemente, na prática, são os seguintes:

a) Polarização fixa

Na **figura 6,** mostramos a polarização de um transistor NPN, ligado na configuração de emissor comum, sendo que na **figura 7**, mostramos um exemplo prático desta polarização. Como se pode notar, a bateria **E** fornece a tensão e a corrente do coletor, através do resistor de carga RL. Por outro lado, essa mesma bateria provê a corrente de base que flui através do resistor R_b. A corrente de base permanece invariável e, por isso, diz-se que a polarização é **fixa**.

Este tipo de polarização é raramente utilizado por ser instável. Justifica-se tal afirmação pelo fato desta configuração depender do ß (ganho de corrente) do transistor, o qual, conforme a variação de temperatura, sofre um perceptível acréscimo, visto que a corrente de base permanece constante. Este fenômeno é conhecido como **avalanche térmica**.

Realmente ao aumentar a temperatura do material semicondutor, verifica-se uma agitação térmica, desestruturando, assim, as ligações entre os átomos e liberando alguns elétrons. Havendo elétrons livres, aumenta-se o valor das correntes dos terminais do transistor, sendo que este aumento de corrente provoca um novo incremento na temperatura do semicondutor, e assim sucessivamente, culminando com a destruição do transistor.

b) Polarização automática

O circuito de polarização conhecido com o nome de **polarização automática** é aquele que mostramos na **figura 8**, enquanto que, na **figura 9**, sugerimos um exemplo prático desta polarização.

Como se nota, emprega-se uma só bateria. A polarização de base é efetuada por meio do resistor R_b ligado entre a base e o coletor, pelo que a tensão que polarizará a base será proveniente do coletor. Desta maneira, caso haja um aumento de temperatura, haverá um incremento (acréscimo) da corrente de coletor.

Considerando-se que o resistor de carga forma um divisor de tensão em conjunto com o transistor, chegamos à expressão:

$$E = V_{RL} + V_{CE} \qquad (1)$$

onde,
E = tensão da bateria
V_{RL} = tensão sobre o resistor de carga
V_{CE} = tensão entre coletor e emissor.Porém,pela lei de Ohm,temos que **E=R. I,** o que nos permite alterar a fórmula (1) para:

$$V_{CE} = E - R_C \cdot I_C$$

Agora tornou-se fácil constatar que, aumentando-se o valor da corrente de coletor (I_C) diminui-se a tensão entre

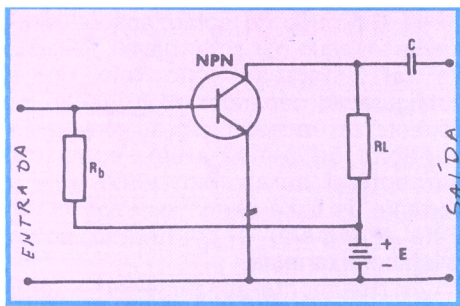



Figura 6 - Polarização fixa em configuração emissor -comum.

Figura 7 - Exemplo de montagem da figura anterior.

Figura 8 - Polarização automática em emissor-comum.

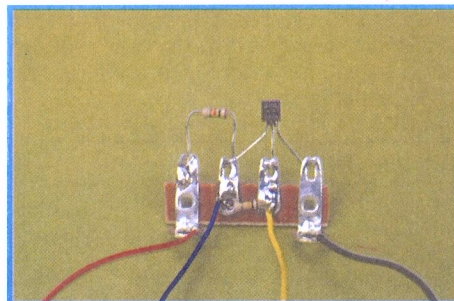



Figura 9 - Simples montagem do circuito da figura 8.

Figura 12 - Exemplo de montagem do circuito da figura 11.

coletor e emissor (V_{CE}).

Com a diminuição de V_{CE}, diminui-se a tensão sobre o resistor Rb e, conseqüentemente, a corrente de base, restabelece-se, assim, o equilíbrio do conjunto.

Cabe aqui um breve comentário: O resistor R_b, neste tipo de polarização, provoca uma realimentação negativa do sinal a ser amplificado, conforme será visto posteriormente.

O ganho do conjunto, devido a isto, torna-se reduzido. Com o intuito de reduzir a realimentação, pode-se dividir o resistor de base em dois, e acrescer à junção de ambos um capacitor de desacoplamento, conforme mostra a **figura 10.**

c) Polarização por divisão de tensão

Este processo de polarização consiste ele em dividir a tensão da bateria através de dois resistores. A corrente de base é retirada desse divisor. Na **figura 11**, mostramos o circuito básico, do qual desenvolveu-se algumas variantes, como o aluno poderá constatar em momento oportuno. Paralelamente a isto, o aluno pode observar, na **figura 12**, uma montagem ilustrativa deste circuito. É conveniente citar que as variantes desenvolvidas se fizeram necessárias buscando uma melhor estabilidade de funcionamento ao circuito básico, além de lhe proporcionar um bom ganho independente do fator ß (beta).

Observações:

1ª) Os circuito básicos de polarização foram apresentados para transistor do tipo NPN. Caso se trate de transistor PNP, os circuitos permanecem válidos, bastando apenas inverter as polaridades da bateria E.

2ª) Mostramos sempre o circuito de emissor comum, por se tratar do mais usado na prática, mas nada impede que se utilize outra configuração.

VI - Estabilização

De um modo geral, quando se trabalha com transistores, uma vez fixado o ponto de trabalho, ele varia, ou seja, fica instável. Isto ocorre por dois motivos principais: a **corrente de fuga** e a grande **diferença de características** que existe entre transistores, ainda que sejam do mesmo tipo (dispersão de características).

a) Corrente de fuga

A **corrente de fuga** de um transistor, também chamada de **corrente de saturação** e representada por I_{CO}, é uma pequena corrente que existe entre base e coletor, na ausência de corrente de emissor, isto é, quando o emissor está sem ligação. Note que ela existirá também quando o emissor estiver ligado, constituindo uma corrente parasita, que se soma à corrente do emissor. Essa corrente é pequena nos transistores de baixa potência (alguns microampères), mas tem o inconveniente de crescer rapidamente com a temperatura, o que provoca a mudança do ponto de trabalho escolhido para o transistor, prejudicando seu funcionamento.

b) Dispersão de características

Mesmo no estágio atual de desenvolvimento na fabricação de transistores, dificilmente transistores de um mesmo tipo têm idênticas características. Diz-se, então, que há dispersão de características. Ora, basta que o transistor não tenha as características que o projetista de circuito admitiu, para que o funcionamento do circuito não seja o previsto.

Para evitar esses dois inconvenientes é que se procura **estabilizar** o ponto de trabalho do transistor, utilizando circuitos de polarização, onde as tensões e correntes se adaptem automaticamente, dentro de certos limites, é lógico, e mantenham o ponto de funcionamento escolhido. Esses circuitos são chamados de **estabilizados**.

Figura 10 - Polarização automática de base:menor realimentação.

Figura 11 - Polarização por divisor de tensão.

CLASSES DE AMPLIFICAÇÃO

I - Introdução

Já estudamos a ação amplificadora dos transistores. Esta ação é utilizada de diversos modos nos circuitos eletrônicos,

tendo em vista os resultados que se deseja obter. Em razão disso, costuma-se dividir os amplificadores ou, melhor dizendo, a ação amplificadora, em três classes, designadas pelas letras A, B e C, cujas características principais analisaremos a seguir.

II - Amplificação classe A

Antes de entrar na definição de amplificação de classe A, vamos ver um conceito que permitirá entender mais facilmente a classificação da amplificação. Esse conceito é o da **curva dinâmica** ou **característica dinâmica** de um transistor.

a) Curva dinâmica

Quando analisamos o transistor como amplificador, mostramos que, escolhendo-se uma corrente para o coletor e outra para a base, fica determinada a tensão de coletor-emissor. Essas três grandezas, fixam o que chamamos de **ponto de trabalho** ou de **repouso do transistor**.

No processo de amplificação, ao aplicar-se um sinal alternado na base do transistor, há modificações no valor da corrente de base. Essa modificação no valor da corrente de base provoca um deslocamento do ponto de trabalho, fazendo variar a tensão e corrente de coletor. Essas novas posições do ponto de repouso, se levadas a um gráfico, determinam uma curva, que é chamada de **curva dinâmica** ou **de transferência** do transistor. Essa curva é traçada, variando-se a corrente de base e anotando-se a corrente de coletor. Na **figura 13**, mostramos uma **curva dinâmica de transferência**, típica.

Para fins de amplificação, as características não lineares das regiões de saturação e de corte são evitadas. A **região de saturação** foi indicada pela linha vertical em V saturação, e a **região de corte** por corrente de base igual a zero. Somente a região não hachurada é empregada para fins de amplificação.

b) Amplificação classe A

Diz-se que um amplificador é de classe A, quando o ponto de operação e o sinal de entrada são tais, que **a corrente de coletor no circuito de saída circula o tempo todo.**

Graficamente, este fato é representado como indicamos na **figura 14**.

Na característica de coletor do transistor, a oscilação correspondente da corrente na saída nos terminais de um resistor de carga é em torno de 250 mA de pico.

Para a corrente de base de polarização mostrada na figura 14, o transistor opera com uma tensão entre coletor e emissor de 15 V e uma corrente de coletor em torno de 560 mA (ponto Q).

A amplificação de classe A, é largamente utilizada em amplificadores de tensão e de pequena potência. O rendimento dos amplificadores classe A é bastante baixo; entretanto, esses amplificadores são muito usados, porque se pode conseguir baixa distorção, isto é, deformação de sinal, desde que se escolha adequadamente o ponto de repouso.

Queremos esclarecer que se chama de rendimento do transistor amplificador a **relação entre a potência de saída** (potência útil de corrente alternada) **e a potência de corrente contínua absorvida pelo transistor.** Teoricamente, o rendimento máximo é de 50%, mas na prática o rendimento é da ordem dos 25% ou menos.

III - Amplificação classe B

Um amplificador de classe B é aquele em que a **corrente de coletor** circula somente durante a **metade do ciclo** (180° do sinal de entrada), quando se aplica uma tensão alternada à base do transistor.

De acordo com a definição acima, é fácil compreender que na classe B o ponto de repouso deve coincidir com o **ponto de corte**, pois, em sendo assim, quando o semiciclo do sinal é positivo, existe amplificação. Para o semiciclo negativo do sinal, a base torna-se mais negativa que o corte, não havendo amplificação.

Tudo isso está ilustrado na **figura 15**. Como o aluno percebe, o transistor em classe B corta o semiciclo negativo, o que produz enorme distorção, já que o sinal de saída não tem a mesma forma que o sinal de entrada. Mesmo assim, a amplificação em classe B é bastante utilizada na prática, nos amplificadores de potência, fazendo-se um arranjo com dois transistores, de modo que cada um amplifique um dos semiciclos. Esse arranjo é chamado de montagem em **contrafase** ou "push-pull" (lê-se: puxe-pull), que estudaremos oportunamente.

A grande maioria dos receptores de rádio alimentados a pilha tem seu estágio de som em classe B, pois isso economiza a energia das pilhas, já que, não havendo sinal ou com o rádio em baixo volume, a corrente que circula pelos transistores de potência é bastante baixa.

Outra vantagem do amplificador de classe B é que o rendimento do transistor é bem maior que em classe A. Teoricamente, o rendimento da amplificação classe B é de 78,5%. Na prática, consegue-se rendimento da ordem de 50 a 65%, o que é muito bom. Quando se quer potência de saída elevada em amplificadores de som,

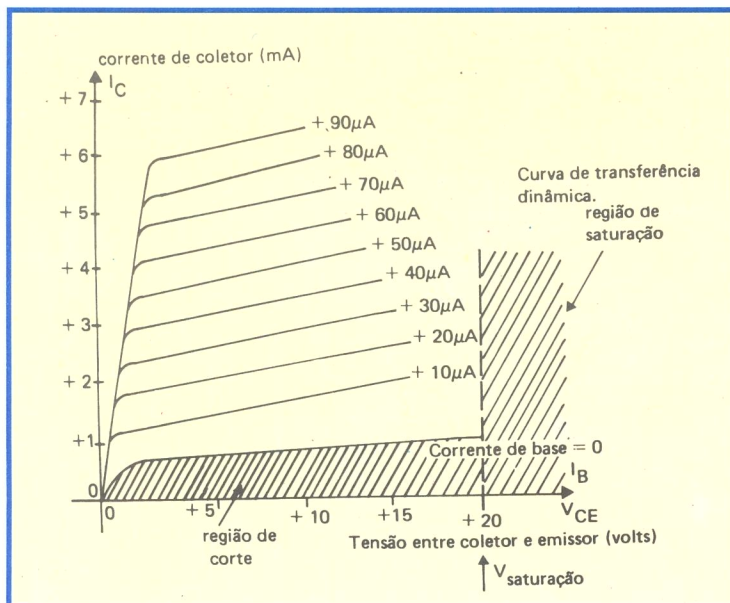



Figura 13 -Exemplo de curva dinâmica de transferência de um transistor.

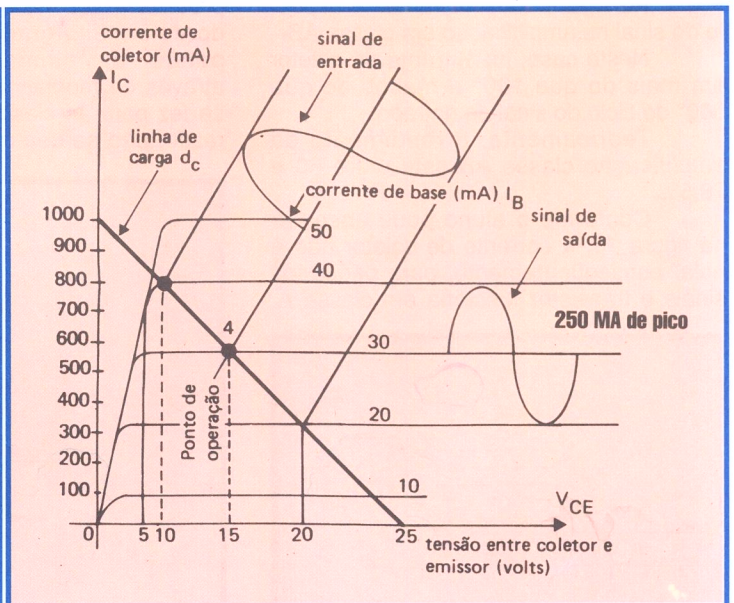



Figura 14 - Gráfico de transferência do sinal no amplificador classe A.

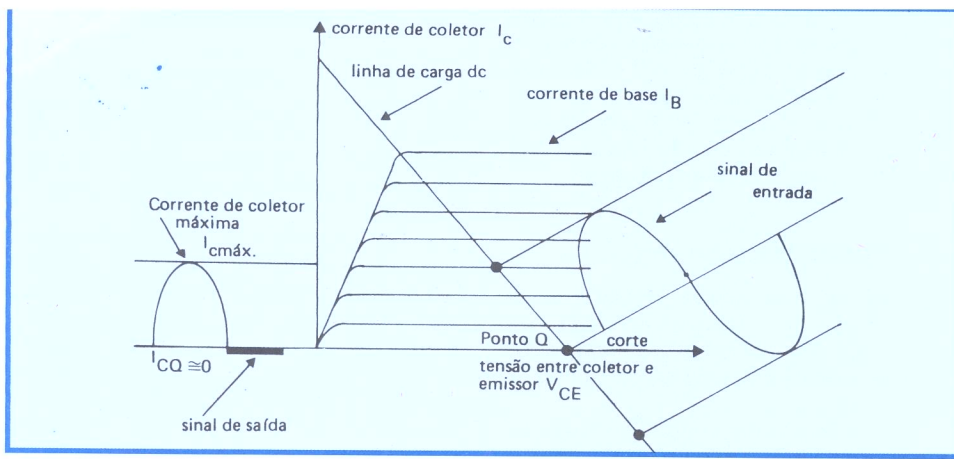



Figura 15-Gráfico de transferência do sinal no amplificador classe B.

recorre-se à classe B.

Se a amplificação é de classe B, o ponto de polarização é estabelecido no corte; então, o dispositivo está polarizado sem corrente de coletor, portanto, o transistor não dissipa potência. Apenas quando se aplica sinal surge uma corrente média no transistor, aumentando a dissipação do transistor conforme aumenta o sinal de entrada.

IV - Amplificação classe AB

A amplificação em classe AB é uma operação intermediária entre as classes A e B. Isto significa que a potência que se consegue com um transistor em classe AB é maior que em A, porém menor que em classe B.

Define-se a **amplificação em classe AB** como sendo aquela em que a polarização de base e o sinal alternado são tais que a corrente de coletor em um transistor, circula durante um período de tempo **maior que a metade do ciclo, porém menor que o ciclo completo**.

Na **figura 16**, mostramos o aspecto do sinal na amplificação em classe AB.

Neste caso, há corrente de coletor em mais do que 180° e menos do que 360° do ciclo do sinal de entrada.

Teoricamente, o rendimento da amplificação classe AB está entre 50 e 78,5%.

Conforme o aluno pode observar na figura 16, a corrente de coletor não é nula, conseqüentemente, para pequenos sinais o transistor funciona em classe A.

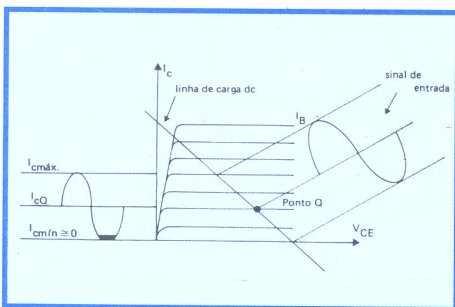



Figura 16 -Gráfico de transferência do sinal no amplificador classe AB.

Quando o sinal é elevado, ele ultrapassa o ponto de corte e o transistor funciona em classe B. Vem daí a denominação classe AB. A deformação na reprodução do meio ciclo negativo do sinal será relativamente grande. Esse fato obriga a que se usem **dois** transistores em montagem **contrafásica,** para eliminar tal distorção.

V - Amplificação classe C

Diz-se que um amplificador é de classe C, quando a polarização da base é mais negativa que o valor de corte, de modo que a corrente de coletor seja nula, quando não exista excitação, e circule somente durante uma parte do semiciclo positivo da tensão aplicada ao transistor (tensão de excitação).

Na **figura 17**, mostramos o aspecto do sinal na amplificação em classe C.

Na amplifição classe C a corrente de coletor (saída) conduz menos do que 180° do sinal de entrada.

É fora de dúvida que a distorção produzida por essa classe de amplificadores é muito grande, não se podendo pensar em eliminar essa distorção, através de montagem contrafásica, como se fez para as classes B e AB. Por essa razão, **não se usa** amplificação de classe **C em amplificadores de som**.

O rendimento teórico dessa classe de amplificador tem o limite máximo de 100% e, na prática, conseguem-se valores de 70 a 85%, o que é muito bom.

Posto que a deformação é muito grande, a operação em classe C é empregada quando se necessita de grandes potências e os efeitos da distorção possam ser desconsiderados. É o que acontece nos osciladores e amplificadores de radiofreqüência. Os estágios de saída das estações transmissoras de AM (amplitude modulada), que o aluno sintoniza em seu rádio, são todos em classe C.

Observação:

Um transistor, quando projetado para uso geral, pode funcionar em qualquer das classes que citamos. Entretanto, os fabricantes criaram tipos especiais, que proporcionam melhores resultados, quando funcionam nas condições para as quais foram desenvolvidos.

Assim, existem transistores especialmente criados para amplificação em classe A, que têm curva de transferência altamente linear e baixa resistência de coletor; há transistores especiais para classe B, que operam no corte; outros transistores foram criados, para trabalharem em classe C, em transmissores de rádio, onde são requeridas potências de saída elevada.

VI - Distorção

Uma das aplicações mais comuns dos transistores está na amplificação e reprodução de som nos amplificadores de rádio e sistemas de alta fidelidade, e na amplificação de vídeo (imagem), nos aparelhos de televisão. O ideal seria que o som reproduzido pelo alto-falante fosse exatamente igual aquele que atingiu o microfone ou foi gravado no disco e, também, que a imagem mostrada pelo tubo do aparelho de TV tivesse a mesma fidelidade daquela vista pela câmera, no estúdio. Quando isso não acontece, ou

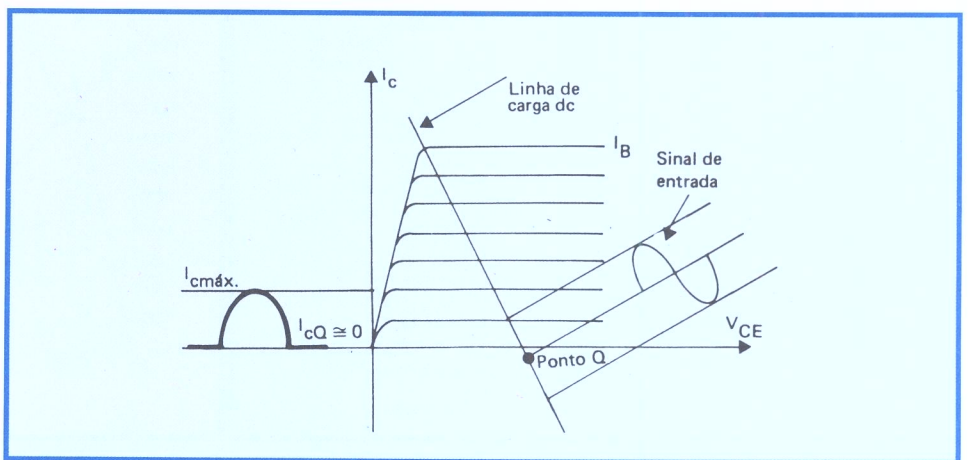



Figura 17 -Gráfico de transferência do sinal no amplificador classe C.

seja, durante o processo de amplificação produz-se alteração na forma de onda, o som e a imagem não se reproduzem como eram em sua origem. Diz-se, então, que houve distorção ou deformação. É o que acontece, por exemplo, quando o aluno se olha num espelho de má qualidade. Sua imagem aparece distorcida (ou deformada).

Como os transistores não são dispositivos perfeitamente lineares, pois, conforme o aluno teve oportunidade de observar, a curva dinâmica de transferência não é uma reta, eles introduzem certa distorção no sinal amplificado. De acordo com a causa, pode-se classificar a distorção:

1ª) Distorção de amplitude

Este tipo de distorção se apresenta quando o amplificador amplifica de maneira desigual as componentes de freqüências diferentes que se apresentam em uma onda. Expliquemos: Uma onda de 100 Hertz, por exemplo, é formada pela onda fundamental de 100 Hertz e pela soma de uma série de ondas de amplitude muito menor e de freqüências múltiplas de 100, que são chamadas de **harmônicos**. Assim, a onda de 100 Hz contém harmônicos de 200 Hz, 400 Hz, etc.

Quando se amplifica a onda de 100 Hz de nosso exemplo, em um amplificador ideal que não produza deformação, tanto a fundamental como os harmônicos são igualmente amplificados e, na saída, a onda tem exatamente a mesma forma que na entrada. Suponhamos agora que o amplificador não seja linear. Então, serão gerados os harmônicos no interior do amplificador, os quais se somarão na onda fundamental e, na saída, a onda não terá mais a forma original. Diz-se, então, que há distorção de amplitude. Na **figura 18,** mostramos a distorção de amplitude.

2ª) Distorção de freqüência

Quando o ganho de um amplificador variar com a freqüência, a forma de onda do sinal, na saída, será diferente da forma de onda da entrada, a menos que o sinal seja de uma só freqüência. Diz-se, então, que há distorção de freqüência.

Por exemplo, suponhamos que na entrada do amplificador sejam aplicados dois sinais: um de 100 Hz e outro de 1000 Hz, e que ambos tenham amplitude de 0,1 V. Admitamos, também, que o ganho do amplificador seja 100. Nestas condições, se não houver distorção de freqüência na saída, recolheremos um sinal de 100 Hz com 10 volts e outro de 1000 Hz, também com 10 volts.

Se recolhermos, por exemplo, o sinal de 100 Hz com 1 Volt e o de 1000 Hz com os 10 volts, concluíremos que houve uma distorção de freqüência. A distorção de freqüência é ocasionada pelos elementos do circuito associados ao transistor, incluindo a impedância de entrada do transistor. Assim, no acoplamento RC que estudamos, o capacitor de acoplamento opõe-se à passagem das freqüências baixas e dá livre trânsito às freqüências altas de mesma amplitude. Isto quer dizer que, quando se deseja reprodução de freqüências baixas, o capacitor deve ter capacitância alta. Na **figura 19**, ilustramos a distorção de freqüência para dois sinais de mesma amplitude.

Figura 18 -Distorção de amplitude.

Figura 19 -Distorção de frequencia.

3ª) Distorção de fase

A distorção de fase é um tipo de deformação que acontece quando o tempo de passagem através do amplificador não é o mesmo para todas as freqüências. Por exemplo, suponhamos que duas ondas, uma de 100 Hz e outra de 200 Hz, sejam aplicadas à entrada do amplificador. Essas duas ondas se combinam, dando na saída uma onda complexa. Entretanto, se o amplificador mudar a fase da onda de 200 Hz, por exemplo, atrasando-a de 180°, a onda complexa na saída terá forma completamente diferente da onda original.

A distorção de fase, geralmente, é produzida pela presença de elementos reativos (indutores e/ou capacitores) no circuito do amplificador.

Nos amplificadores de som, a distorção de fase muda o som resultante. Entretanto, essa distorção costuma ser oculta por outros defeitos do sistema amplificador, razão pela qual se costuma afirmar que o ouvido não distingue muito bem, ou seja, não acusa esse tipo de distorção. Já, quando se trata de amplificador de vídeo, o problema muda de figura, pois o olho é bastante sensível e acusará facilmente a distorção de fase. Quando há distorção de fase, a imagem aparece borrada. Na elaboração dos circuitos amplificadores, tomam-se cuidados especiais, para evitar ou diminuir o máximo possível a distorção de fase. A **figura 20** ilustra a distorção de fase.

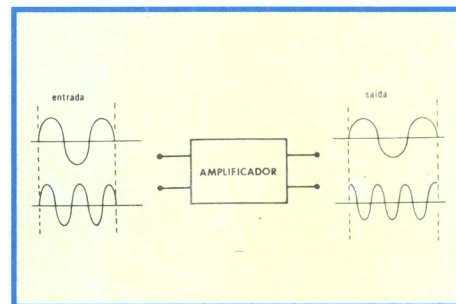



Figura 20 -Distorção de fase.

4ª) Distorção por intermodulação

A distorção por intermodulação é bastante importante nos amplificadores de som. Esse tipo de distorção é devido a não linearidade do transistor amplificador.

Vimos que uma onda pura, quando é aplicada a um amplificador não linear, introduz harmônicos que não estavam presentes na entrada. Ora, estando presentes na entrada do amplificador várias freqüências, além dos harmônicos fundamentais, estarão presentes na saída harmônicos de freqüências que são as somas e as diferenças das várias freqüências de entrada. Essa distorção é percebida pelo ouvido como ruídos, isto é, som "áspero" e desagradável.

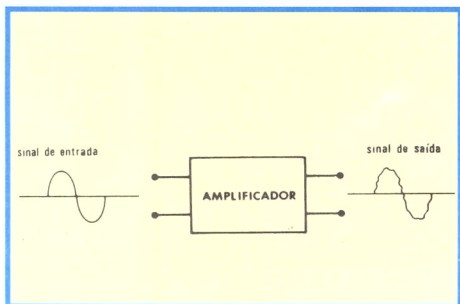
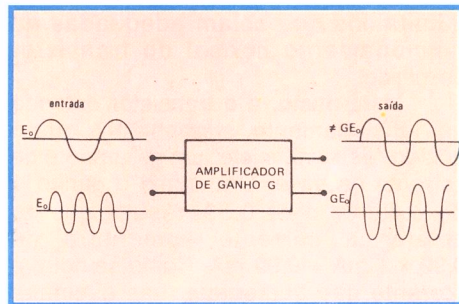
A distorção por intermodulação é indicada em porcentagem.

5ª) Distorção harmônica

A distorção harmônica, bem como a distorção por intermodulação, é uma conseqüência da distorção de amplitude. Por isso, esses tipos de distorção são classificados como **distorção não linear**, já que a distorção de amplitude é conseqüência da não linearidade do amplificador.

Chamamos de distorção harmônica total a relação do valor eficaz de todos os harmônicos para o valor eficaz total, tomado em porcentagem.

Quando estudarmos os amplificadores de alta-fidelidade, voltaremos ao assunto da distorção, com detalhes mais objetivos; por enquanto, o aluno deve apenas tomar esse primeiro contato com o assunto, procurando não esquecer que:

> Distorção é todo tipo de alteração indesejável que um sinal sofre ao ser retirado de um amplificador.

CURSO DE ELETRÔNICA BÁSICA RÁDIO - TV
9ª LIÇÃO PRÁTICA
AMPLIFICAÇÃO DE ÁUDIO

Nesta lição, vamos continuar o assunto da lição teórica, tendo em vista principalmente os **aspectos práticos** da amplificação dos pequenos sinais de áudio.

I - O que é áudio?

Em técnica eletrônica, chamam-se de **áudio** os sons audíveis, isto é, os sons que nossos ouvidos conseguem perceber. Em experiências que foram realizadas com centenas de pessoas, chegou-se a conclusão de que um ouvido **perfeito** é capaz de distinguir sons cujas freqüências estejam entre 16 e 16.000 Hertz, isto é, o som de freqüência mais baixa que o ouvido humano percebe é o de 16 Hertz, e a mais alta, de 16.000 Hertz.

Existem casos excepcionais de pessoas que conseguem ouvir até 20.000 Hertz; por isso, alguns autores consideram como **faixa de áudio** as freqüências cujos limites são 20 e 20.000 Hertz.

Em resumo, **áudio** é sinônimo de som, e **faixa de áudio** são as **freqüências** que vão desde 20 até 20.000 Hertz.

II - O que é amplificação?

Vimos, na lição teórica, que **amplificação** significa aumento. O amplificador de áudio é, então, um dispositivo que aumenta a intensidade do som. Para aumentar a intensidade do som, o amplificador pode elevar a tensão, a corrente ou a potência. Daí, os tipos de amplificação que indicamos na lição teórica. Devemos ressaltar que o amplificador eletrônico transforma o som, que se aplica a sua entrada, em vibrações elétricas, cujas grandezas características - tensão, corrente ou potência - é que sofrem as amplificações, sendo, posteriormente, reconvertidas em vibrações mecânicas, isto é, em som. Esta é, por exemplo, a diferença que existe entre um amplificador eletrônico e uma buzina, que também é um amplificador de som, onde não há mudança na forma de energia, mas somente condução e ressonância através de um tubo de forma especial.

III - O transistor como amplificador

Mostramos, na lição teórica, que o transistor pode amplificar, ou seja, aumentar o valor de uma grandeza elétrica (corrente, tensão ou potência). Note, entretanto, que o transistor **não cria** energia, sendo a mesma fornecida pelas fontes externas.

Vejamos qual é o mecanismo da amplificação, ou seja, como é possível que um pequeno sinal aplicado aos terminais de entrada do transistor seja recolhido com valor bem alto nos terminais de saída. Para ilustração do que vamos descrever, suponhamos que um transistor NPN seja montado em configuração base comum, conforme mostramos na **figura 21**. Nesse tipo de montagem, sabemos que a resistência de entrada é baixa, a de saída é alta e que o ganho de corrente é menor do que um. Para facilidade de exemplificação, admitamos que a resistência de entrada seja de 50 Ω; e que o ganho de corrente seja de 0,99. Vamos supor, ainda, que a resistência de carga, ou seja, aquela ligada ao coletor, seja de 5 kΩ.

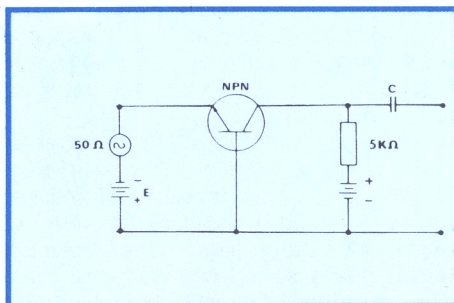



Figura 21-Transistor NPN em configuração base-comum.

Não nos preocuparemos com os valores das tensões das baterias, mas admitamos que sejam adequadas ao funcionamento normal do transistor escolhido.

Isto posto, e o transistor estando em funcionamento, suponhamos que o gerador de sinal "injete" um miliampère de corrente na base. Ora, como o ganho α de corrente é de 0,99, resulta que no coletor a corrente aumentará de 0,99 x 1 mA = 0,99 mA. Como se nota, a corrente não aumentou, mas diminuiu, pois o ganho de corrente é **menor que um.** O aluno por certo estará perguntando: onde está a amplificação? Vejamos:

Para passar 1 mA (um miliampère) na base, segundo a lei de Ohm, precisamos de uma tensão de 1 mA x 50 Ω, pois E = R . I, (ou V = R . I) e admitimos que R = 50 Ω (resistência de entrada do transistor) e I = 1 mA. A tensão do sinal aplicado à entrada do circuito será:

$$1 \text{ mA} \times 50\ \Omega = (1 \div 1000)\text{ A} \times 50\ \Omega = (50 \div 1000)\text{ V} = 0{,}05\text{ V}$$

Por outro lado, a queda de tensão no resistor de carga, devida à variação de 1 mA na base, é de:

$$(0{,}99 \div 1000)\text{ A} \times 5000\ \Omega = \frac{0{,}99 \times 5000}{1000} = 4{,}95\text{ V}$$

aplicando a lei de Ohm e lembrando que o resistor de carga é de 5 KΩ.

Pois bem, verificamos pelos cálculos acima que 0,05 V na entrada (emissor-base) do transistor provocou variação de 4,95 V na saída (coletor-base). Conseqüentemente, houve **ganho de tensão** de:

$$G_V = \frac{4{,}95\text{ V}}{0{,}05\text{ V}} = 4{,}95 \div 0{,}05 = 99$$

Como o aluno nota, o transistor não amplificou corrente, mas amplificou a tensão em 99 vezes. Isto se dá devido à grande diferença entre a resistência de entrada e a de saída. Podemos demonstrar, também, que houve amplificação de potência. De fato, sabemos que a potência pode ser calculada multiplicando-se a tensão pela corrente. Assim, na entrada (emissor-base), a tensão de sinal, como calculamos, é de 0,05 V para a variação de corrente de 1 mA, ou seja, 0,001 A. Na saída (coletor-base), a tensão é de 4,95 V para a corrente de 0,99 mA, ou seja, 0,00099 A. Então, as potências são:

a) Na entrada:

$$P = V.I = 0{,}05 \times 0{,}001 = 0{,}00005\text{ Watts}$$

b) Na saída:

$$P = V.I = 4{,}95 \times 0{,}00099 = 0{,}0049005 \text{ Watts}$$

Dividindo a potência de saída pela de entrada, teremos o ganho de potência, ou seja,

$$G_p = 0{,}0049005 \div 0{,}00005 = 98{,}01$$

Portanto, o transistor apresentou, no caso, ganho de potência de aproximadamente **98 vezes**.

Algumas observações:

a) Sobre as resistências de entrada e saída :

Na lição teórica, mostramos que as resistências de entrada e saída do transistor dependem do tipo de configuração escolhido. Além disso, essas resistências dependem, também, do transistor, ou seja, de sua resistência interna de base, emissor e coletor. Para que o aluno tenha uma idéia da ordem de grandeza dos valores dessas resistências, vamos indicar abaixo os valores aproximados:

1 - **Montagem base comum**

resistência de entrada ≅ 50 Ω - baixa
resistência de saída ≅ 500 KΩ a 1 MΩ - alta

2 - **Montagem coletor comum**

resistência de entrada ≅ maior que 50 KΩ - alta
resistência de saída ≅1 KΩ - baixa

3 - **Montagem emissor comum**

resistência de entrada ≅ de 0,5 a 25 KΩ - média
resistência de saída ≅ de 40 a 10 KΩ - média

Os valores numéricos que expusemos acima têm a finalidade de dar ao aluno, segundo afirmamos, a ordem de grandeza das resistências (impedâncias, de um modo geral) de entrada e saída dos transistores, nas três montagens básicas.

Deve ser observado que essas resistências dependem do tipo de transistor e, também, das resistências do gerador e de carga. De fato, como o transistor tem estrutura contínua, suas resistências internas estão ligadas entre si; conseqüentemente, variando-se a resistência do gerador, essa variação se refletirá na resistência de saída. Pelo mesmo motivo, a variação da resistência de carga terá reflexo na resistência de entrada.

No transistor que tomamos para exemplo, a resistência de entrada é de 50 Ω, na montagem em base comum, somente quando a resistência de carga é nula, ou seja, quando a saída é curto-circuitada. Caso a resistência de carga seja infinita, isto é, quando a saída está aberta (sem resistor de carga), a resistência de entrada sobe a cerca de 250 Ω.

Do exposto, segue-se que a resistência de entrada de um transistor é indicada para resistência de carga nula (saída curto-circuitada) e a de saída, para resistência do gerador nula (entrada curto-circuitada).

O aluno deve ter notado que temos insistido muito sobre as resistências de entrada e saída do transistor e, certamente, estará perguntando sobre a utilidade desse conhecimento. Adiantamos, desde já, que a transferência de energia de um circuito para outro se dá com o máximo de eficiência, quando as impedâncias dos dois circuitos, ou seja, impedância de entrada de um e impedância de saída do outro, são iguais.

Realmente, admitamos que o circuito de ataque, isto é, o circuito 1, de entrada, seja um gerador de tensão **E** e de impedância **R** e que o circuito 2, de saída, tenha sua impedância de entrada representada por **Z**, como mostramos na **figura 22**. Vamos analisar o que acontece quando a impedância **Z** do circuito 2 (atacado) varia. Suponhamos, para começar, que **Z** seja **infinito,** isto é, muito grande. Então, o circuito 2 **não retira** nenhuma corrente do circuito 1; em conseqüência, **não há** transferência de energia do circuito 1 para o circuito 2.

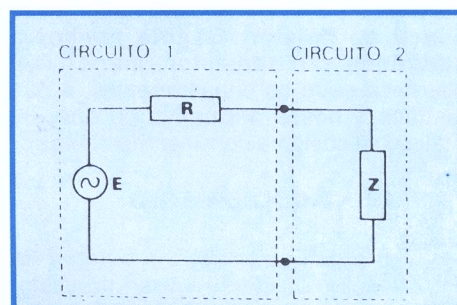



Figura 22-Análise de transferência de energia entre dois circuitos.

Admitamos, agora, a situação oposta, isto é, em que a impedância **Z** do circuito 2 seja nula, o que é o mesmo que dizer que o circuito 2 está com sua entrada em curto-circuito. Quando isso acontece, a corrente **fornecida** pelo circuito 1 é a maior possível, mas a energia do circuito 1 é dissipada (absorvida), toda ela, na impedância **R**, não havendo transferência para o circuito 2.

Finalmente, quando **Z** tem valor compreendido entre os dois extremos citados, a energia do circuito 1 é transferida para o circuito 2. Mas, observe o aluno o seguinte: se a impedância **Z** for muito maior que **R**, a corrente será bastante reduzida, o que significa que o circuito 1 não estará fornecendo toda a energia de que é capaz. Por outro lado, se a impedância **Z** for muito menor que **R**, a energia fornecida pelo circuito 1 será grande, mas a maior parcela será gasta na impedância **R**, pois, sendo a mesma a corrente em **R** e **Z**, sabemos que a energia é maior na impedância de valor mais elevado. Com esta seqüência de raciocínio, é fácil admitir que, quando as resistências, tanto do circuito de ataque (circuito 1) como a do circuito atacado (circuito 2), são iguais, o circuito 1 fornece sua máxima energia e o circuito 2, conseqüentemente, recebe a máxima energia. Quando isso acontece, dizemos que **há casamento das impedâncias**. A noção de casamento de impedâncias será constantemente citada em nosso curso, pois ela é bastante importante. Para que o aluno tenha, desde já, uma idéia concreta de sua impedância, podemos lembrar o caso da **adaptação** da antena de televisão ao receptor. A antena constitui o primeiro circuito, ou seja, o de ataque, e o televisor, o segundo, isto é, o circuito atacado. Caso a impedância da antena não seja igual à do receptor acontecem problemas na recepção, tais como enfraquecimento dos sinais ("chuvisco"), reflexos na linha (imagem borrada), etc.

Além desse, muitos exemplos existem, de mau funcionamento de circuitos, devido à falta de adaptação de impedâncias. Quando se liga um fonocaptador (cápsula reprodutora do som gravado no disco) do tipo de cristal ou cerâmica, cuja, impedância costuma ser da ordem de 50 KΩ, à base de um transistor amplificador de tensão, ligado na configuração de coletor comum, o sinal gerado pelo fonocaptador normalmente é amplificado, porque a impedância de entrada do transistor, nesta configuração, é como sabemos, elevada e tem, geralmente, valor da ordem de 50 KΩ. Há, portanto, uma perfeita adaptação de impedâncias. Por outro lado, se a mesma cápsula fonocaptadora for ligada à base de um transistor, funcionando na configuração mais comum, que é de emissor comum, o som não será amplificado normalmente pelo transistor, porque a impedância de entrada deste componente se apresentará bastante baixa em relação à do fonocaptador, e somente uma pequena parte da tensão gerada por este último será transferida ao transistor.

Conforme se observa, por estes dois exemplos, quando são ligados entre si **dois ou mais** circuitos, geralmente, procura-se fazer com que as impedâncias sejam **iguais**, para que a energia seja transferida **sem grandes perdas**.

b) Sobre o fator de amplificação:

O aluno encontrará freqüentemente, tanto em nosso curso como em livros e revistas especializadas e nos manuais, referência a dois fatores de amplificação de corrente: um designado pela letra α (lê-se: alfa) e outro pela letra β (lê-se: beta).

O fator de amplificação de corrente α refere-se à ligação do transistor, na montagem em base comum; conseqüentemente, é a **relação** entre a corrente de coletor e a de emissor que, como vimos na lição teórica, dará sempre um número **menor do que um**, já que a corrente de coletor é ligeiramente menor que a de emissor.

Nos manuais de transistores, o ganho de corrente α também costuma ser indicado por h_{fb}.

O fator de amplificação (ou ganho de corrente) β refere-se à montagem do transistor, na configuração de emissor comum, que, como já citamos, é a mais usada na prática. Vimos que, nessa montagem, β é a relação entre a corrente de coletor e a de base. Como esta última é bem menor que a do coletor, resulta que β é um número bem maior do que a unidade, ou seja, β **é sempre maior do que um**. Nos manuais, o fator de amplificação de corrente β pode ser indicado por h_{fe}.

Os ganhos de corrente podem ser de corrente alternada ou de contínua. Como não são iguais, costuma-se diferenciá-los da seguinte maneira:

Ganho em corrente contínua - α_o ou h_{FB} para montagem em base comum, e β ou h_{FE} para montagem em emissor comum.

Ganho em corrente alternada - α ou h_{fb} para montagem em base comum, e β ou h_{fe} para montagem em emissor comum.

O ganho de corrente de um transistor não é sempre o mesmo; ele depende do ponto de funcionamento escolhido. Assim, o transistor do tipo BC 108, por exemplo, tem β que varia de 125 a 500, dependendo da tensão coletor-emissor (V_{CE}) e da corrente de coletor (I_C) escolhidas.

c) Sobre corrente de coletor e de emissor:

É costume, nas aplicações práticas, considerar a corrente de coletor numericamente igual à do emissor. Embora isso não conduza a erros apreciáveis, devemos chamar a atenção do aluno para o fato de que, **na realidade**, a corrente do coletor é ligeiramente **menor** que a do emissor. Para explicar esse fato, retomemos a representação de

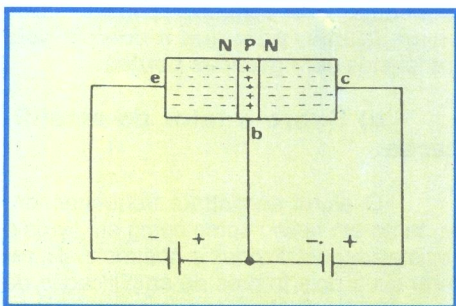



Figura 23-Polarização de um transistor NPN.

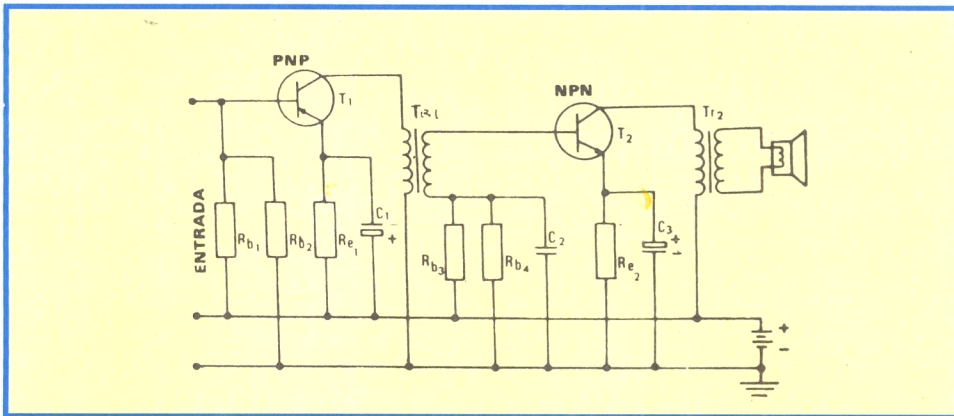



Figura 24-Amplificador de áudio com transformadores de acoplamento.

bloco do transistor **NPN**, que reproduzimos na **figura 23**. Sabemos que a corrente emissor-coletor é provocada pela ação das duas baterias em série. Acontece, entretanto, que nem todos os elétrons que partem do coletor (considerando-se o sentido **convencional** da corrente) atingem o emissor, pois uma pequena quantidade deles se recombina com as lacunas (cargas positivas) da base. Por outro lado, a corrente que atravessa a base é reforçada pela corrente base-emissor, já que essa junção está polarizada no sentido direto por uma das baterias. Resulta, então, que a corrente de emissor é igual à soma das duas correntes: corrente de coletor e corrente de base, ou seja, a corrente de emissor é maior que a do coletor. Devemos esclarecer, entretanto, que a diferença entre as duas correntes não é grande, sendo que a corrente de emissor atinge o máximo de 5%, aproximadamente, mais que a do coletor. Quanto melhor a qualidade do transistor, menor é a diferença entre as duas correntes, o que justifica a nossa afirmativa de que, na prática, se costuma considerá-las **iguais**.

IV - Acoplamento

Freqüentemente, um estágio de amplificação utilizando um só transistor não é suficiente para elevar o sinal até o nível de tensão, corrente ou potência desejada. Então, é preciso empregar mais de um estágio amplificador. A ligação entre os estágios, ou seja, a transferência do sinal da saída de um estágio para a entrada do outro é chamada de **acoplamento**.

Tipos de acoplamento

Os métodos básicos de acoplamento que se costuma aplicar nos estágios que utilizam transistores são: **a transformador, a resistor-capacitor e direto**.

a) Acoplamento a transformador

No acoplamento a transformador, o primário desse componente é ligado à saída do primeiro amplificador e o secundário é ligado à entrada do segundo estágio. Assim, o sinal é eletromagneticamente transferido de um estágio ao outro.

O acoplamento a transformador foi bastante utilizado nos estágios de audiofreqüência, mas, atualmente, está sendo abandonado, em razão dos inconvenientes que citaremos mais adiante. Há casos, entretanto, em que o acoplamento por transformador se impõe. É o que acontece quando, além do acoplamento, também se exige seletividade, isto é, deve haver transferência de sinal de uma determinada freqüência. Nos receptores de rádio e televisão, nas etapas de amplificação de freqüência intermediária, que estudaremos oportunamente, são utilizados transformadores sintonizados no acoplamento.

Na **figura 24**, apresentamos um amplificador de audiofreqüência em que são usados dois transformadores de acoplamento. O primeiro transfere o sinal do coletor do transistor T_1 para a base do transistor T_2. O segundo transfere o sinal do coletor de T_2 para o alto-falante. A função do transformador, nos dois casos, é transferir a energia de um estágio ao outro.

A principal vantagem do acoplamento a transformador é que ele permite adaptar as impedâncias de entrada e de saída, tendo em vista um maior ganho de potência.

O transformador T_{r1} costuma ser chamado de **transformador excitador, impulsor ou "driver"** (lê-se: "draiver").

O transformador T_{r2} é conhecido como transformador de saída.

As principais desvantagens do acoplamento por transformador, nos amplificadores de áudio, são:

1ª) Dificuldade em projetar-se um transformador que seja eficiente em toda a faixa de freqüência de áudio.

2ª) Possibilidade de zumbidos, devido a induções de corrente alternada de outros circuitos.

3ª) Peso e volume do transformador. Realmente, para que o transformador seja eficiente, seu núcleo

deve ter dimensões relativamente grandes, comparadas às dos demais componentes do circuito. Além disso, como o núcleo é de ferro, o peso do transformador também é importante, principalmente em aparelhos portáteis, que devem ser leves e compactos.

4ª) Preço. O transformador é um componente caro e, por isso, sempre que possível, seu uso é evitado.

b) Acoplamento a resistor-capacitor

O acoplamento a resistor-capacitor (ou resistência-capacitância), chamado de acoplamento **RC**, é o mais difundido na prática, principalmente nas etapas amplificadas de áudio de baixo nível e baixo ruído.

A resposta de freqüência, ou seja, a faixa de freqüência que é possível transferir de um estágio a outro, é maior, utilizando-se o acoplamento RC, do que se pode conseguir com o acoplamento a transformador.

A desvantagem do acoplamento RC, em comparação com aquele a transformador, está em que, não havendo casamento das impedâncias de entrada e de saída, haverá perda de energia.

As principais vantagens do acoplamento RC são:

1ª) Baixo custo, pois tanto o resistor como o capacitor são componentes relativamente baratos.

2ª) Pequeno peso e volume, já que tanto o resistor como o capacitor são leves e pequenos. Esse detalhe é muito importante, principalmente em aparelhos portáteis, cuja miniaturização é crescente.

3ª) Maior resposta de freqüência, como já indicamos.

Na **figura 25**, mostramos um amplificador de dois estágios, enquanto que, na **figura 26**, apresentamos a montagem deste circuito como exemplo prático. O acoplamento entre eles é efetuado utilizando-se a rede **RC**, ou seja, é do tipo **resistor-capacitor**. O resistor **R** é a carga do primeiro transistor e o capacitor **C** permite a passagem do sinal alternado para o segundo transistor. Esse capacitor bloqueia a corrente contínua, evitando que o **ponto de repouso** do segundo transistor seja deslocado.

Nos amplificadores de áudio,

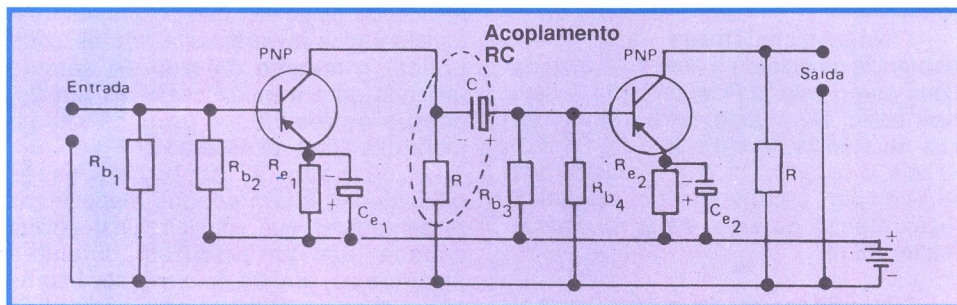



Figura 25-Amplificador de dois estágios.

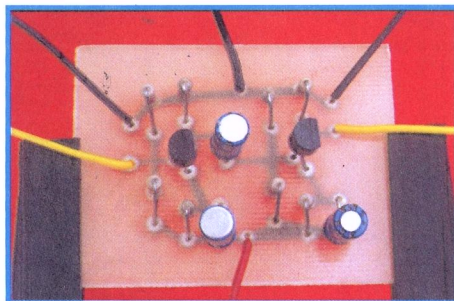



Figura 26-Exemplo de montagem da figura anterior.

devido a baixa resistência de entrada do segundo estágio, o capacitor C deve apresentar reatância bastante baixa, o que exige que sua capacitância seja relativamente elevada.

Para dar um exemplo de amplificador acoplado por resistor-capacitor, mostramos, na **figura 27**, um amplificador que tem ganho aproximado de 11 000 vezes. Isto significa que um sinal de um milivolt aplicado na entrada do circuito aparecerá na saída com o valor de:

$$1\ mV \times 11\ 000 = 11\ 000\ mV$$
$$11\ 000\ mV \div 1000 = 11\ Volts$$

O esquema de tal amplificador é ilustrado na **figura 28.**

Figura 27-Exemplo de montagem de um amplificador com acoplamento RC.

c) Acoplamento direto

No acoplamento direto, a saída de um estágio é ligada diretamente à entrada do outro. A grande vantagem desse tipo de acoplamento é que a resposta de freqüência não depende da rede de acoplamento, já que ela não existe, e também a economia de componentes que se consegue. Na **figura 29**, apresentamos um amplificador de dois estágios, utilizando o acoplamento direto.

O aluno deve notar que o resistor Rc1 é a carga para o 1º transistor, e resistor de polarização para o segundo.

Uma desvantagem do acoplamento direto é que o número de etapas amplificadoras que se pode usar é limitado. Essa limitação é devida ao fato de que as variações da corrente de polarização em uma etapa, em conseqüência, por exemplo, de uma

Figura 28-Esquema de um amplificador com acoplamento RC.

variação de temperatura, são amplificadas por todas as outras, podendo provocar instabilidade.

Observações:

1ª) Com os transistores, também é possível utilizar o acoplamento a indutor-capacitor. Entretanto, esse tipo de acoplamento não é muito utilizado, razão pela qual não nos deteremos no assunto.

2ª) No acoplamento RC a transistor, o valor da capacitância depende da

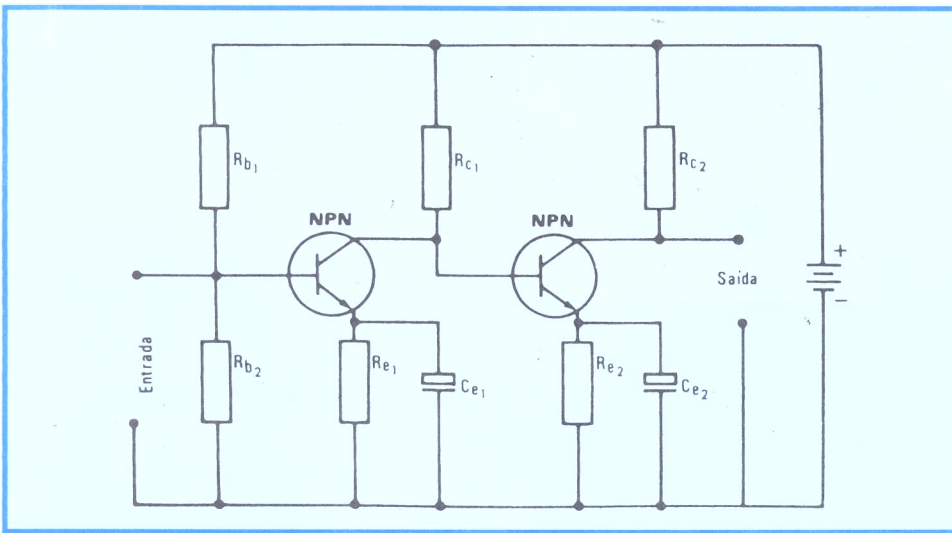



Figura 29-Amplificador de dois estágios com acoplamento direto.

menor freqüência a ser amplificada, e também da baixa resistência de entrada do transistor. De fato, para que a transferência do sinal seja eficiente, é necessário que a reatância oferecida pelo capacitor seja menor que a resistência de entrada do transistor. Em caso contrário, já que a reatância do capacitor e a resistência de entrada do transistor formam um divisor de tensão, e como a resistência de entrada é mais baixa, somente a pequena tensão aí desenvolvida é que será introduzida no transistor, e a maior parte do sinal será perdida na reatância do capacitor.

Por exemplo, admita o aluno que o transistor tenha resistência de entrada de 5 KΩ e queiramos que a menor freqüência a ser amplificada seja 100 Hz. Vamos ver qual o capacitor a ser usado. O esquema simplificado é aquele mostrado na **figura 30**. Admitamos que o valor de R seja suficientemente grande para não influir no acoplamento.

Pois bem, para que a transferência de sinal seja pouco atenuada, a reatância do capacitor deve ser, no máximo, igual à resistência de entrada. Como a reatância é calculada por:

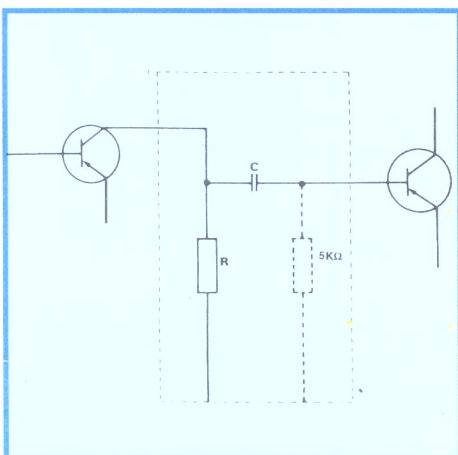



Figura 30-Circuito simplificado para análise.

$$X_c = 1 \div 6{,}28 \times F \times C$$

em que F é a freqüência em Hertz e C a capacitância em Farads, resulta, igualando ao valor da resistência, a fórmula:

$$C = 1 \div 6{,}28 \times F \times R$$

que permite determinar a capacitância.

Para os valores numéricos do problema, teremos:

$$C = 1 \div 6{,}28 \times 100 \times 5\,000$$
$$C = 1 \div 3.140.000 = 0{,}000000318 \text{ F}$$
$$C = 0{,}318\ \mu\text{F}$$

ou, aproximadamente, 0,33 μF.

Como se vê, no presente caso deve ser utilizado um capacitor de 0,33 μF por ser o valor comercial mais próximo.

Nos transistores atuais, a resistência de entrada é bem mais alta, de modo que o valor da capacitância é bem mais baixo. Realmente, para o transistor cuja resistência de entrada é de 25 KΩ, ou seja, 5 vezes maior, que a considerada no exemplo, o cápacitor deverá ser 5 vezes menor, ou seja, de aproximadamente, 68 nF.

No decorrer de nosso curso, mostraremos outros exemplos.

AMPLIFICAÇÃO DE POTÊNCIA

I - Amplificação de tensão e de potência

Vimos que a ação amplificadora de um transistor consiste em recolher, nos terminais de saída, o sinal aplicado aos de entrada, com nível mais elevado. Por exemplo, se aplicarmos 10 mV entre base e emissor de um transistor, e recolhermos 1 V na saída, ou seja, entre coletor e emissor, diremos que houve amplificação de 100 vezes, porque o sinal de saída é 100 vezes maior que o de entrada.

Em eletrônica, distinguem-se dois tipos de amplificação: **amplificação de pequenos sinais**, também chamada de **amplificação de tensão,** e **amplificação de sinais elevados** ou **amplificação de potência**.

Conceitualmente, não há diferença entre amplificação de tensão e amplificação de potência, mas faz-se essa distinção para maior facilidade na resolução dos problemas.

De fato, na amplificação de tensão, o sinal de entrada do dispositivo amplificador (transistor) tem valor baixo e a excursão do ponto de trabalho, ou seja, a variação para mais e para menos que sofre a tensão de base é muito pequena, de modo que se pode considerar a "curva de transferência" como linear e aplicar equações algébricas simples, na solução do problema.

Considerar a excursão linear significa admitir que as características do transistor, tais como sua resistência interna, o fator de amplificação, etc., são constantes. Com essas considerações, resulta que se podem aplicar expressões matemáticas bastante simples, para determinar a amplificação do transistor.

Quando se deseja obter, na saída do dispositivo amplificador, um sinal de potência elevada, como, por exemplo, aquele necessário para acionar o cone de um alto-falante grande, então temos de aplicar, na entrada, um sinal também relativamente elevado. Neste caso, ultrapassa-se a região reta da curva de transferência; o fator de amplificação e a resistência de coletor não podem mais ser considerados invariáveis e não se pode aplicar o mesmo método de cálculo utilizado para a amplificação de tensão, porque os resultados práticos seriam muito diferentes do esperado.

Visando a contornar essas dificuldades foram criados dispositivos amplificadores que admitem sinal alto na entrada, sem que produzam, durante a amplificação, grande deformação. São os dispositivos amplificadores de potência. A análise dos amplificadores de potência é

feita utilizando-se as curvas características distribuídas pelos fabricantes, porque não valem, agora, as expressões usadas na análise do amplificador de tensão, já que a linearidade não mais se verifica.

Resumindo, temos:

1º) O amplificador de tensão recebe sinal de pequena amplitude na entrada, tais como os sinais de um microfone, fonocaptador, câmera de TV, antena de receptor, etc., e entrega o sinal na saída muitas vezes amplificado e com baixa ou nenhuma distorção. Os dispositivos amplificadores geralmente têm fator de amplificação elevado.

2º) O amplificador de potência recebe, em sua entrada, um sinal de tensão elevada, quase sempre proveniente de amplificadores de tensão, e entrega na saída o sinal com variação elevada, seja na tensão, corrente ou nos dois, resultando daí a potência que se deseja, para aplicar a transdutores, como alto-falantes, antenas de transmissor, bobinas defletoras de TV, etc.

A distorção nos amplificadores de potência sempre está presente, mas deve ser mantida dentro de certos limites, através da escolha conveniente dos componentes do circuito e das condições de funcionamento dos dispositivos amplificadores. Geralmente esses dispositivos têm baixo ou médio fator de amplificação.

II - Amplificação de tensão

Um estágio amplificador de tensão típico é mostrado na **figura 31**, com o transistor como dispositivo amplificador. Esse elemento tanto pode ser do tipo PNP como do NPN. Escolhemos a configuração de emissor comum, porque é a mais utilizada.

Nessa figura, o aluno deve observar que chamamos de $\mathbf{E_s}$ a tensão de sinal, ou seja, aquela que deve ser aplicada; e chamamos de $\mathbf{E_o}$ a tensão na saída do amplificador, portanto, o sinal amplificado.

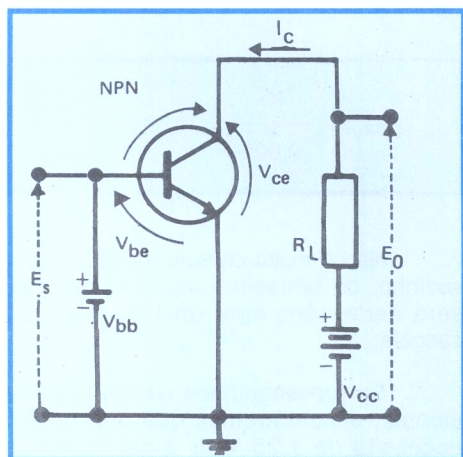



Figura 31-Polarização de um transistor NPN em configuração emissor-comum.

De agora em diante, passaremos a chamar de **ganho** do amplificador o número que indica quantas vezes o sinal de entrada foi aumentado. Representando esse número por **G**, podemos escrever a relação:

$$E_o = G \cdot E_S \text{ ou } G = E_O/E_S$$

Na figura 31, indicamos as tensões de polarização para o transistor. Trata-se de tensões contínuas, que fixam o ponto de trabalho do dispositivo. Note que:

Vcc é a tensão da fonte de alimentação de coletor

Vbb é a fonte de alimentação de base do transistor.

Vce é a tensão entre coletor e emissor.

Vbe é a tensão entre base e emissor.

Ic é a corrente contínua de coletor.

O resistor RL é chamado de **resistor de carga**. Na realidade, o resistor de carga é uma resistência pura apenas para a polarização do transistor, porque, para o sinal variável, a carga quase sempre é uma impedância, conforme mostraremos logo mais.

É importante que o aluno observe a referência das tensões, ou seja, em relação a que se diz que o terminal do transistor é positivo ou negativo.

Para a figura 31, como o transistor lá representado é do tipo NPN, o aluno notará que o emissor é negativo em relação à base e também em relação ao coletor. A polarização do transistor está correta, porque a junção base-emissor está polarizada no sentido direto, e a junção base-coletor, no sentido inverso.

O circuito da figura 31 é apresentado para que o aluno se familiarize com a nomenclatura e também com a referência das tensões. Na prática, esse circuito sofre modificação, que passaremos a mostrar. Veja o circuito da **figura 32**, onde apresentamos um amplificador transistorizado.

Vamos analisar as diferenças aparentes entre esse esquema e o da figura 31.

Inicialmente, notamos que não estão indicadas as fontes Vcc e Vbb. A fonte Vcc, nos esquemas, costuma ser indicada por +B, que é o valor da tensão contínua, geralmente proveniente da retificação da tensão alternada da rede de distribuição. Quanto à fonte Vbb, devemos esclarecer que não existe, porque a base está polarizada pelo método de polarização automática.

O resistor de emissor (R2) foi acrescido ao circuito a fim de que se possa estabilizar, em parte, a corrente de

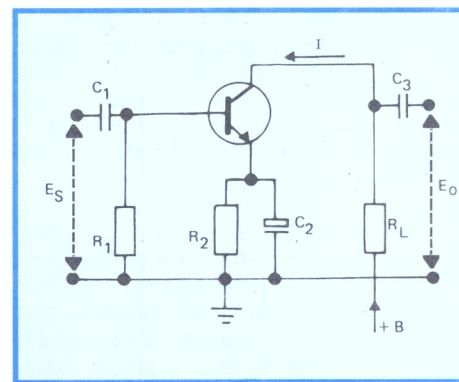



Figura 32-Amplificador transistorizado para análise.

emissor (I_e). Esta instabilidade de corrente é causada, como já estudamos, pela variação térmica que o transistor sofre. A variação térmica reflete-se sobre a corrente de coletor (Ic) e, conseqüentemente, sobre a de emissor.

Como o aluno se recorda, a corrente de coletor que circula no **sentido convencional**, do coletor para o emissor, provoca uma queda de tensão nas junções do transistor e sobre o resistor R2. Considerando-se que a queda de tensão ocorre (se desloca) do ponto com potencial mais alto para o mais baixo, segue-se que o terminal do resistor ligado ao emissor do transistor é positivo em relação ao outro, conectado à massa. Então, a massa (terra ou ponto de retorno) é negativa, se comparada ao emissor. A base está ligada ao chassi através do resistor R1, logo, ao negativo da fonte.

Conforme já indicamos anteriormente, a tensão Vbe é medida entre emissor e base e, verificando o circuito da figura 32, poderá parecer que ela é de valor negativo, ou seja, a tensão na base sendo mais negativa que a tensão no emissor, uma vez que o resistor R1 encontra-se com um de seus terminais conectado ao terra, enquanto que o outro terminal deste resistor encontra-se, aparentemente, desconectado (junção base-coletor polarizada inversamente, que equivale a um circuito aberto).

Porém isto não é verdade, se recordarmos que, em uma junção real, sempre haverá a circulação de uma

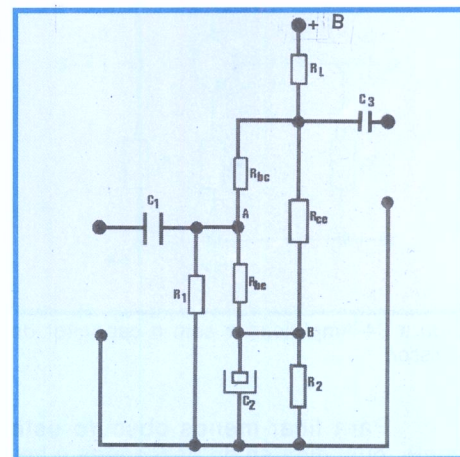



Figura 33-Circuito equivalente da figura 32.

pequena corrente de fuga, a qual nos permite considerar a junção base-coletor, quando polarizada inversamente, como sendo equivalente a um resistor de valor ôhmico elevado; o circuito da figura 32 poderia, então, ser representado da forma indicada na **figura 33**.

Por tal figura fica fácil constatar que a junção base-emissor e o resistor R2 encontram-se em série, enquanto que este conjunto acha-se em paralelo com R1. Por sua vez, esta última associação forma, em conjunto com a junção base-coletor e RL uma associação série, estabelecendo-se assim, um divisor de tensão, conforme indicado na figura 33.

Em paralelo com o resistor de emissor existe um capacitor chamado, na prática, de **capacitor de emissor** ou de **derivação**. A finalidade desse capacitor é derivar a corrente variável do sinal, diretamente para o chassi, evitando sua passagem pelo resistor de emissor. Vejamos o que aconteceria se não houvesse o capacitor de emissor.

Admitamos o circuito da **figura 34**. Quando circula corrente de coletor, essa corrente provoca queda de tensão no resistor R2, a qual faz variar a tensão de polarização. Tudo se passa como se existisse uma nova fonte de sinal, **em série** com a fonte original aplicada à base. Mas, quando a tensão de base é **positiva**, a corrente de coletor **aumenta** e, com isso, a queda de tensão nos resistores de carga e de emissor também aumentam. Como **aumentar** a queda no resistor de emissor significa aumentar a tensão negativa na base (pois o valor ôhmico da junção emissor-base diminui, "aproximando" o ponto A do B), conclui-se que a tensão do sinal e a tensão produzida no resistor de emissor estão em **oposição**. Se a tensão de sinal diminui, é claro que a tensão de saída também diminui, porque esta é sempre igual ao produto do ganho pela tensão do sinal.

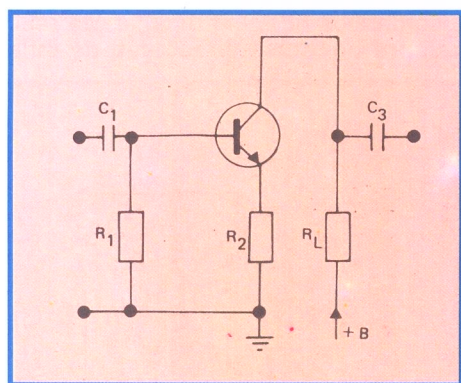



Figura 34-Amplificador sem o capacitor de emissor.

Para ficar menos obscuro este ponto, que, diga-se de passagem, é importante por se tratar de um caso de **realimentação negativa**, que veremos com bastante detalhes em outra parte do curso, vamos expor o mesmo problema, mas raciocinando com números hipotéticos.

Suponhamos, então, que o amplificador da figura 34 tenha resistor de emissor de 1 000 Ω, resistor de carga de 100 KΩ e ganho de tensão igual a 100. Em sendo assim, se o emissor estivesse ligado diretamente no chassi, aplicando-se 0,1 Volts de sinal na base, recolheríamos 10 Volts no coletor. Como o emissor não está ligado à massa, que novo valor de sinal é necessário aplicar à base, para que tenhamos 10 Volts no coletor?

Qualquer que seja o valor do sinal de entrada, na saída ter-se-á tensão igual a esse valor multiplicado pelo ganho do dispositivo. Essa tensão de saída reparte-se proporcionalmente entre os resistores de emissor e de carga. Como, em nosso exemplo, a relação entre os dois resistores citados é de 1 para 100 (R2 ÷ R1 = 1 K ÷ 100 K = 1 ÷ 100) e sendo Eo a tensão de saída, resulta que o resistor de emissor contribui na base com uma tensão oposta de $\frac{1}{100}$ Eo. Então, a nossa nova tensão de sinal deve ser de 0,1 Volt mais a tensão de emissor, ou seja:

$$E_S = 0{,}1 + \frac{Eo}{100}$$

Pela nossa imposição, o valor de Eo (tensão de saída) deve ser de 10 V; logo, o de entrada deverá ser de:

$$E_S = 0{,}1 + \frac{10}{100} = 0{,}1 + 0{,}1 = 0{,}2\ V$$

A conclusão é que precisamos aplicar 0,2 V de sinal, para recolher os mesmos 10V que obtínhamos, aplicando 0,1V; logo, o ganho do amplificador **reduziu-se à metade**, em conseqüência de **não existir** o capacitor de emissor.

Vamos ligar novamente o capacitor de emissor(também chamado de capacitor de contorno). Então, não haverá queda no resistor de emissor, devido à corrente variável, ou seja, devido a componente alternada da corrente do coletor, porque o capacitor, como se sabe, deixa passar facilmente a corrente alternada. Não havendo essa queda, toda a tensão de sinal é aplicada à base e o ganho não se reduz.

III - Acoplamento resistor-capacitor

O elo de ligação entre estágios amplificadores é chamado de **acoplamento**. Quando vários amplificadores são ligados de modo que o sinal de saída de um seja injetado na entrada do outro, diz-se que o acoplamento é em **série** ou **cascata**. Na prática, geralmente, utilizam-se dois ou mais amplificadores ligados em cascata, para que um pequeno sinal alcance o valor desejado. Vamos dar um exemplo utilizando valores hipotéticos.

Admita o aluno que dispomos de um fonocaptador magnético que gera tensão de 5 mV e que desejamos que esse sinal seja reproduzido com a potência de 4,5 W. Então, consultamos um manual de transistores e procuramos um elemento que nos dê a potência desejada. O manual nos dá uma série de informações sobre o transistor, inclusive que a resistência de carga deve ser de 50 Ω, **por exemplo**. Como sabemos que a potência pode ser calculada pela expressão:

$$P = V^2 \div R$$

e como conhecemos P, que é 4,5 W, e R, que é 50 Ω, aplicamos a fórmula e tiramos o valor da tensão de saída que deve ter nosso amplificador. Dará:

$$V = \sqrt{P\ .\ R} = \sqrt{4{,}5 \times 50} = \sqrt{225} = 15\ V$$

Sendo 5 mV, ou seja, 0,005 V a tensão de entrada, segue-se que o ganho de tensão do nosso amplificador deve ser de:

$$G_V = \frac{15}{0{,}005} = 3000$$

Não é muito comum transistor que, sozinho, dê tamanha amplificação; logo, será necessário ligar dois ou mais em cascata.

Se prosseguirmos na consulta ao manual, encontraremos que o transistor necessita de 1,25 V de sinal (valor de pico), para entregar os 15 V; logo,

podemos determinar sua amplificação. Transformando o valor de pico em eficaz, resulta:

$$E_S = 1,25 \div 1,41 \cong 0,88$$

Em conseqüência, o ganho de tensão do estágio é de:

$$G_V = \frac{15}{0,88} \cong 17$$

Como o último estágio, que é o de potência, tem ganho de 17, o anterior deverá proporcionar ganho de:

$$G_V = \frac{3000}{17} \cong 176,47$$

Ainda assim, o ganho é muito alto para ser satisfeito por um único transistor;logo ,usaremos dois,que proporcionem a amplificação de aproximadamente 50 vezes cada um. A amplificação dos dois seria então de 50 x 50 = 2 500, valor mais alto do que necessitamos. Isso não tem importância, porque vão aparecer quedas na amplificação, devido à inclusão de controle de volume e corretores de tom.

Pelo exposto, resulta que, para elevar o sinal de entrada de 5 mV a 15 V, que é a tensão na **resistência de carga** do transistor de saída, necessitamos de três estágios amplificadores, sendo os dois primeiros de tensão e o último de potência. Esses estágios são **acoplados em cascata**. Já estudamos, noutra lição, os métodos de acoplamento. Na prática, o mais usado é o RC, ou seja, o acoplamento através de um capacitor e resistor. Utilizando-o, podemos desenhar o circuito mostrado na **figura 35**. Trata-se de um circuito teórico, destinado a mostrar a necessidade de vários estágios amplificadores, e o acoplamento RC, representado no desenho por R3 C3 e R6 C5.

Os resistores R3 e R6 são os resistores de carga dos transistores T1 e T2, respectivamente. Os capacitores C3 e C5 são de acoplamento (ou passagem) do sinal de um estágio para o outro.

No último estágio, a transferência do sinal do transistor T3 para o transdutor (alto-falante) é feita através do transformador de saída Tr.

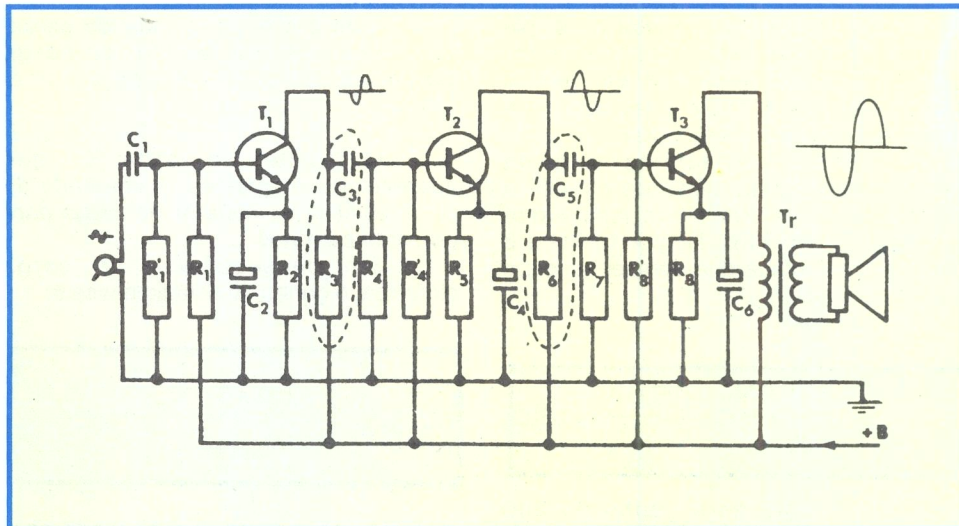



Figura 35-Circuito teórico de um amplificador de três estágios.

IV - Carga estática e dinâmica

No circuito da figura 35, chamamos R3 e R6 de resistores de carga dos transistores T1 e T2, respectivamente.

O ganho do estágio amplificador, sendo ele transistorizado, depende da resistência de carga. Para sermos mais objetivos, apresentamos, a seguir, as fórmulas que permitem determinar o ganho do transistor:

$$G_V = \frac{\beta \cdot RL}{Ri}$$

onde ß é o fator de amplificação de corrente na ligação emissor comum; RL é a resistência de carga e Ri a resistência de entrada do transistor.

Como o aluno pode observar na expressão, o ganho depende da resistência de carga de maneira direta, isto é, quando a resistência de carga aumenta, o ganho também aumenta.

Até aí não haveria nada de extraordinário, porque, uma vez escolhida a resistência de carga, o ganho estaria determinado. Essa afirmação, entretanto, não é verdadeira. Vejamos porque: para isso tomemos um estágio amplificador, como o da **figura 36,** onde consideramos o sinal desde a base de um transistor até a base do seguinte.

O resistor RL é o resistor de carga. Vamos admitir, para facilidade de exposição, que o resistor de carga seja de 10 KΩ; o capacitor de acoplamento seja de 1 μF; e que a resistência de base do transistor seguinte (R3) seja de 10 KΩ.

Consultando o manual de transis-

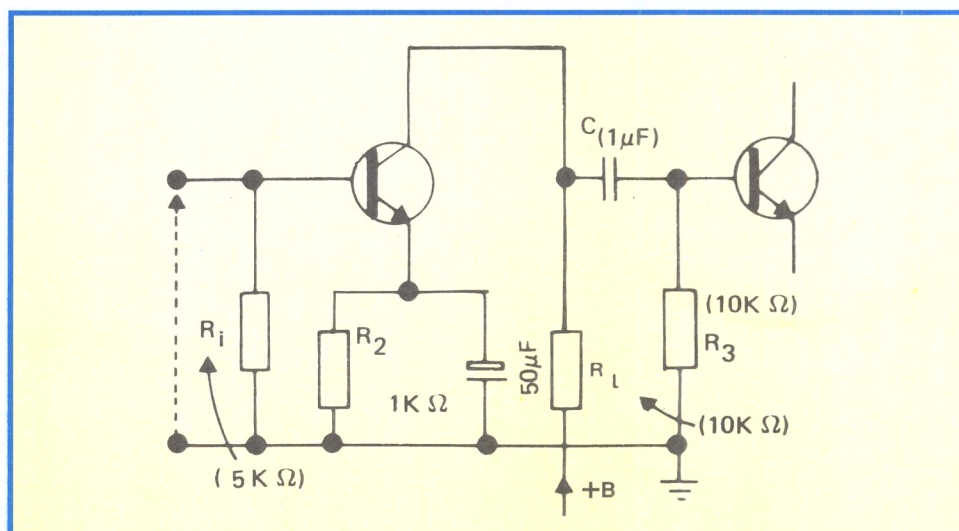



Figura 36-Estágio amplificador.

tores, encontramos que o fator de amplificação de corrente na ligação emissor comum (β) lá indicada e que admitiremos como satisfeitas, é 100 e a resistência de entrada do transistor é de 5 KΩ.

Com esses valores e o da resistência de carga, podemos calcular o ganho do transistor. Para isso basta substituir Ri por 5 KΩ, RL por 10 KΩ e β por 100, na fórmula que apresentamos, e efetuar a conta.

Teremos:

$$G_V = \frac{100 \times 10\,000}{5\,000} = \frac{100 \times 10}{5} = 200$$

O estágio dará ganho de 200 vezes, aproximadamente. Note que o fator de amplificação do transistor é 100, mas a amplificação do estágio (ganho) é mais alta.

O valor encontrado ainda não é o ganho final. De fato, como o capacitor de acoplamento não deve oferecer resistência à passagem do sinal do coletor do transistor para a base do seguinte, então, para a corrente alternada, o circuito será o mostrado na **figura 37**, onde o capacitor se comporta como um curto-circuito e a fonte de +B também. O mesmo acontece com o capacitor de emissor.

O aluno nota que os dois resistores, RL e R3 ficam em paralelo para a corrente variável de sinal. Conseqüentemente, o resistor de carga não é somente RL, mas a associação dele como resistor de base R3 em paralelo.

No caso, essa associação vale:

$$Rp = \frac{10\,000 \times 10\,000}{10\,000 + 10\,000} = \frac{100\,000\,000}{20\,000} = \frac{10\,000}{2}$$

$$Rp = 5\,000\ \Omega$$

Este é o novo resistor de carga. Ele é chamado de resistor de **carga dinâmica**, porque é devido ao sinal variável.

O resistor de carga RL, que aparece nos esquemas, é chamado de carga estática ou **resistor de carga para corrente contínua**.

Em conseqüência da carga dinâmica, o ganho do estágio passa a:

$$G_V = \frac{100 \times 5\,000}{5\,000} = 100$$

Como se nota o ganho se reduziu pela metade.

Vejamos outro exemplo do ganho do amplificador de tensão transistorizado. Agora levaremos em conta, além da resistência de carga estática, as resistências de polarização e a resistência de entrada do transistor.

Vamos calcular o ganho do estágio mostrado na **figura 38**.

Vamos admitir que o transistor tenha fator de amplificação de corrente β igual a 100, e resistência de entrada de 2 400 Ω.

O resistor de carga, estático, mostrado no esquema, é de 4K7 (4700 Ω). Se não existissem outras cargas, o ganho do estágio, segundo a fórmula apresentada, seria:

$$G_V = \beta \frac{RL}{Ri} = 100 \frac{4700}{2400} =$$

$$= 195 \text{ aproximadamente}$$

Verifiquemos as cargas, neste caso:

a) Devido às resistências de polarização:

Para o sinal variável, as resistências de polarização de 10 K e 100 K estão em paralelo; logo, sua equivalência será:

$$Req1 = \frac{10\,000 \times 100\,000}{10\,000 + 100\,000} = \frac{100\,000}{11} =$$

$$= 9\,090{,}9\Omega$$

ou 9 100 Ω, aproximadamente.

b) Devido ao resistor de carga:

Como o capacitor de **100 µF** é um curto-circuito para o sinal, a resistência equivalente calculada acima ficará em paralelo com o resistor de carga. O novo valor da carga será, portanto:

$$Req2 = \frac{9\,100 \times 4\,700}{9\,100 + 4\,700} = \frac{427\,700}{138} =$$

3 100 Ω aproximadamente

c) Devido à resistência de entrada do transistor:

O transistor, como o aluno sabe, é um dispositivo de baixa resistência de entrada. Essa resistência, evidentemente, fará parte da carga para o transistor anterior. Em nosso exemplo, é o transistor T2 que carrega o T1.

A resistência de carga que T2 irá impor, em nosso exemplo, é de 2 400 Ω sendo que esta fica em paralelo com a equivalente, que já calculamos; logo, o valor resultante será de:

$$R1 = \frac{3\,100 \times 2\,400}{3\,100 + 2\,400} = \frac{24 \times 3\,100}{55} =$$

1350 Ω aproximadamente

Esta é a carga efetiva do transistor T1. Com esse valor, podemos determinar o ganho total do estágio. Aplicando a fórmula dada, temos:

$$G_T = 100 \times \frac{1\,350}{2\,400} = 56, \text{ aproximadamente.}$$

Figura 37-Análise do estágio amplificador para a corrente alternada do sinal.

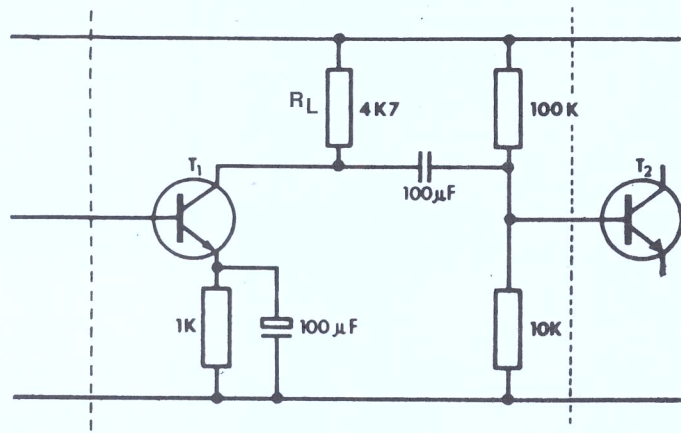



Figura 38-Estágio amplificador para exemplificar o cálculo de ganho.

Observe como o ganho diminui, em razão da carga que se adiciona, ao serem colocadas as resistências de polarização, e, também, devido à resistência de entrada do transistor.

Resumindo, podemos afirmar:

1º) A amplificação de estágios acoplados por resistor-capacitor é afetada para menos, devido à resistência dinâmica.

2º) A resistência dinâmica dos estágios amplificadores transistorizados corresponde à associação em paralelo da resistência de carga para corrente contínua com a resistência de polarização e com a resistência (impedância) de entrada do transistor.

3º) Neste nosso primeiro contato com o problema, não estamos levando em consideração as capacitâncias parasitas, que são as capacitâncias de saída do primeiro transistor, a de entrada do transistor seguinte e a capacitância devida aos fios de ligação. Na **figura 39**, indicamos em pontilhado essas capacitâncias, as quais exercem grande influência na amplificação, principalmente quando a freqüência a ser amplificada é alta.

V - Influência da capacitância do capacitor de acoplamento

No estudo apresentado no item anterior, admitimos que o capacitor de acoplamento dá livre passagem a todas as freqüências de áudio, ou seja, que ele representa um curto-circuito para essas freqüências. Entretanto, isso não corresponde à realidade, porque, para que o capacitor tivesse reatância de 100 Ω, logo, bem diferente de 0Ω que seria o curto-circuito na freqüência de 20 Hz, deveria ter capacitância muito alta, ou seja, de:

$$C = \frac{1}{6{,}28 \times F \times Xc} = \frac{1}{6{,}28 \times 20 \times 100} = \frac{1}{12560}$$

$$= 0{,}00008\ F \text{ aproximadamente}$$

ou: C = 80 µF

Esse valor é exagerado como capacitor de acoplamento. Na prática, usam-se capacitores bem menores, ou seja, de 47nF a 50 µF para transistores. O aluno percebe que, com esses valores, a reatância aumenta e o sinal que passa pelo capacitor diminui. O efeito do capacitor é, então, o de atenuar a amplificação das freqüências mais baixas. Haverá, como já sabemos, distorção de freqüência. Fato semelhante ocorre com o capacitor de passagem de emissor.

Além desses capacitores, a capacitância parasita, principalmente a de entrada do transistor, causa distorção de freqüência, sendo que, neste caso, são as freqüências altas que são atenuadas.

Ainda voltaremos ao assunto.

Figura 39-Capacitâncias parasitas que influenciam na amplificação.

Vocabulário

Absorvida: Consumida.
Adaptação: Ajuste, acomodação.
Atuais: Modernos.
Bloqueia: Impede.
Configuração: Aspecto; forma exterior.
Constantemente: Freqüentemente.
Deslocado: Mudado de um lugar para outro, afastado.
Desvantagens: Inconvenientes; prejuízos.
(Nos) deteremos: (Nos) demoraremos; pararemos.
Difundido: Divulgado; espalhado.
Eficiência: Qualidade de eficiente.
Eficiente: Que dá bom resultado.
Evidentemente: Obviamente; sem dúvida.
Extremos: Pontos mais distantes.
Injete: Introduza.
Instabilidade: Qualidade de instável, que é sujeito a mudanças.
Limitação: Restrição.
Miniaturização: Ato de tornar miniatura, de proporções pequenas.
Seqüência: Continuação.
Vulgarmente: Usualmente; comumente; na linguagem popular.

CURSO DE ELETRÔNICA BÁSICA RÁDIO - TV

9ª LIÇÃO ESPECIAL

TRANSFORMADORES (2ª PARTE) E CURVAS CARACTERÍSTICAS DE TRANSISTORES

6 - Escolha dos condutores

a) Para o primário

A potência do primário é de 20 W e a tensão, 110 V; logo, a corrente será de:

$I = P / V = 20 / 110 \cong 0{,}19A$

Escolhendo a densidade de corrente de 1,5 A / mm², segue-se que o condutor para 0,19 A deverá ter secção de :

$$S = \frac{\text{corrente}}{\text{densidade}} = \frac{0{,}19}{1{,}5} = 0{,}126 \text{ mm}^2$$

Consultando a tabela I, verificamos que o condutor, cuja secção mais se aproxima de 0,126, é o nº 26.

b) Secundário de 6,3 V

Arbitramos corrente de 2,5 A para esse secundário; logo, a secção do condutor, para a densidade de 1,5 A/mm², será:

$$S = \frac{2{,}5}{1{,}5} = 1{,}66 \text{ mm}^2$$

Consultando a tabela de fios, verificamos que o número 15 satisfaz, pois tem secção de 1,65 mm².

Ficam, assim, determinados todos os elementos para o enrolamento do transformador, ou seja, o núcleo, o número de espiras de todos os enrolamentos e o número do fio que se utilizará. Resta-nos verificar se o enrolamento caberá na janela.

7 - Verificação da janela

As dimensões são: a / 2 = 1,5 cm e 2 a = 6 cm, pois a = 3 cm .

A área útil, transformando centímetro em milímetro, será:

$$\frac{a}{2} - 1 = 15 - 1 = 14 \text{ mm} = 1{,}4 \text{ cm}$$

$2\,a - 2 = 2 \times 30 - 2 = 58 \text{ mm} = 5{,}8 \text{ cm}$

Verifiquemos quantas camadas terá cada enrolamento:

a) Primário

Vemos que o primário deve ter 770 espiras de fio nº 26. Consultando a tabela, encontraremos que esse fio esmaltado tem diâmetro de 0,44 mm, e que cabem 22,8 espiras em um centímetro linear de enrolamento. Chamaremos essa relação de **N/cm**, de agora em diante.

Ora, como dispomos de 5,8 cm sobre o carretel, para enrolar as camadas, segue-se que podemos enrolar:

$22{,}8 \times 5{,}8 \cong 132$ espiras, em uma camada.

Como precisamos de enrolar 770 espiras, elas ocuparão:

$770 : 132 \cong 5{,}83$ camadas

Temos de arredondar para 6 camadas, pois ocuparemos as 6 embora a última fique incompleta.

Podemos agora determinar a altura do enrolamento. Para isso, usaremos a expressão:

$$h = cd + e\,(c - 1) + t$$

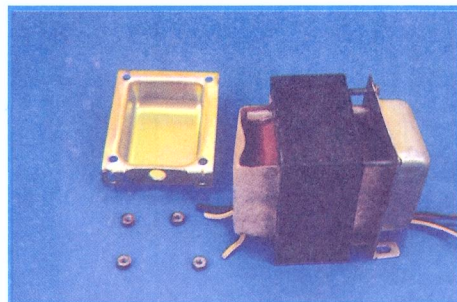



Figura 21-Transformador com tampa protetora.

onde **c** é o número de camadas , **d** o diâmetro do fio em milímetros, **e** a espessura do isolante entre camadas e **t** a espessura do isolante entre os enrolamentos. Tomando o papel de 0,1 mm para isolante entre camadas, e 0,5 mm para isolação entre enrolamento, resulta:

$$h_1 = 6 \times 0{,}44 + 0{,}1\,(6 - 1) + 0{,}5 = 2{,}64 + 0{,}5 + 0{,}5 = 3{,}64 \text{ mm}$$

b) Para o secundário de 6,3 V

Temos:

$N_2 = 44$ espiras
$d = 1{,}50$ mm (tabela I)
$N/cm = 6{,}67$ (tabela I)

$6{,}67 \times 5{,}8 = 38{,}6$ espiras por camadas. Logo, as 44 espiras caberão em duas camadas.

$$h = 2 \times 1{,}5 + 0{,}1\,(2\text{-}1) + 0{,}5 = 3 + 0{,}1 + 0{,}5 = 3{,}6 \text{ mm}$$

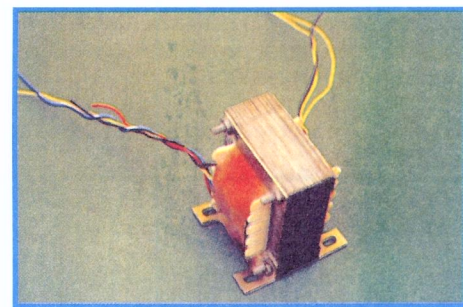



Figura 22-Transformador com proteção simples para os enrolamentos.

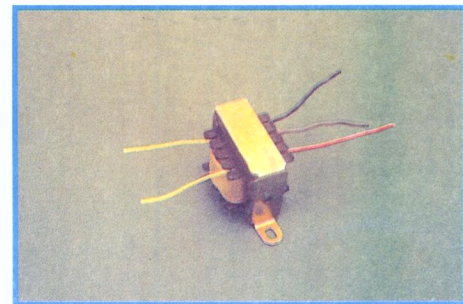



Figura 23-Transformador com blindagem no núcleo.

Tabela de fios para enrolamento de transformadores de pequena potência

Nº AWG	Diâmetro Fio MU mm	Diâmetro Fio esmal. mm	Secção mm²	Espiras por cm: esmaltado	Espiras por cm: 2 X seda 1 X algod.	Espiras por cm: 2 X algod	Ω / Km	Corrente máxima Amp.
8	3,26	3,32	8,35	3,01	2,88	2,81	2,07	25,1
9	2,90	2,96	6,65	3,38	3,19	3,06	2,59	19,9
10	2,59	2,63	5,27	3,78	3,61	3,51	3,27	15,8
11	2,30	2,36	4,45	4,25	4,00	3,86	4,15	12,4
12	2,05	2,11	3,30	4,45	4,45	4,29	5,22	9,9
13	1,83	1,88	2,63	5,32	4,98	4,71	6,36	7,88
14	1,63	1,68	2,09	5,95	5,51	5,47	8,26	6,27
15	1,45	1,50	1,65	6,67	6,12	5,82	10,4	4,95
16	1,29	1,34	1,30	7,46	6,95	6,46	13,2	3,90
17	1,15	1,20	1,04	8,33	7,70	7,14	16,6	3,12
18	1,02	1,07	0,818	9,30	8,54	7,82	21,1	2,45
19	0,91	0,96	0,650	10,40	9,46	8,60	26,5	1,95
20	0,81	0,86	0,515	11,50	10,50	9,32	33,5	1,54
21	0,72	0,77	0,407	13,00	11,50	10,40	42,3	1,22
22	0,64	0,69	0,322	14,50	13,30	11,80	53,6	0,965
23	0,57	0,61	0,255	16,20	14,40	12,60	67,6	0,765
24	0,51	0,55	0,204	18,30	16,10	14,20	84,4	0,612
25	0,45	0,48	0,159	20,40	17,70	15,30	108,0	0,427
26	0,40	0,44	0,126	22,80	19,50	16,50	137,0	0,378
27	0,36	0,39	0,102	25,70	21,20	17,70	169,0	0,306
28	0,32	0,35	0,0805	28,90	23,50	19,30	214,0	0,242
29	0,29	0,31	0,0660	32,30	25,40	20,30	261,0	0,196
30	0,25	0,27	0,0491	35,50	27,70	21,30	351,0	0,147
31	0,23	0,25	0,0415	40,50	30,10	23,30	415,0	0,124
32	0,20	0,22	0,0314	45,50	32,40	24,20	549,0	0,094
33	0,18	0,20	0,0254	50,90	35,00	25,80	619,0	0,076
34	0,16	0,18	0,0201	57,20	37,50	27,20	858,0	0,060
35	0,14	0,16	0,0154	63,80	40,40	28,60	1.120,0	0,046
36	0,13	0,14	0,0132	71,50	43,10	30,20	1.300,0	0,039
37	0,11	0,12	0,00951	80,00	45,80	31,40	1.820,0	0,028
38	0,104	0,112	0,00785	89,30	48,80	32,80	2.210,0	0,023
39	0,090	0,099	0,00636	101,0	51,70	34,20	2.740,0	0,019
40	0,080	0,089	0,00502	112,0	54,80	35,40	3.440,0	0,015
41	0,071	0,077	0,00385	128,0			4.500,0	0,011
42	0,064	0,068	0,00317	149,0			5.450,0	0,009
43	0,057	0,061	0,00257	164,0			6.730,0	0,007
44	0,051	0,054	0,00203	189,0			8.550,0	0,006
45	0,045	0,048	0,00156	209,0			11.110,0	0,005
46	0,038	0,044	0,00114	228,0			15.130,0	0,003

A altura total dos enrolamentos será:

$$ht = h_1 + h_2 = 3,64 + 3,6 = 7,24 \text{ mm}$$

Como dispomos de 14 mm na janela, o enrolamento caberá.

Fica assim exemplificado o cálculo completo de um transformador de alimentação com 1 secundário. Seguindo o roteiro estabelecido, o aluno poderá dimensionar o transformador para qualquer número de secundários.

Observações:

1 - O transformador, após terminado, costuma receber tampas que protegem seu enrolamento, como mostramos nas **figuras 21** e **22.** Na figura 22, mostramos o tipo mais comum, em que se usa apenas cartão para proteção.

2 - As chapas do núcleo do transformador devem ser bem apertadas, para evitar que elas vibrem, quando em funcionamento, o que produz um som desagradável e perfeitamente audível com o receptor em baixo volume.

3 - Quando se apertam as chapas do transformador, é preciso tomar cuidado para que o parafuso não as ponha em curto-circuito, o que provocará aquecimento excessivo do núcleo, com baixo rendimento do transformador. É conveniente, sempre, utilizar parafusos oxidados ou que tenham menor diâmetro que o furo das chapas.

A tampa, além de fornecer uma maior rigidez mecânica, possui a função de blindagem, evitando que o campo magnético se disperça do núcleo, concentrando assim o campo magnético. Um exemplo prático do que foi exposto pode ser visto na **figura 23**, onde vemos um tipo muito comum de transformador, no qual a blindagem é feita apenas no núcleo.

IV - Autotransformadores

O autotransformador pode ser considerado como um caso particular de transformador. Ele possui um só enrolamento, no qual são feitas uma ou mais derivações. Na **figura 24**, apresentamos simbolicamente o autotransformador. Como se pode observar, não há isolação entre os dois circuitos. É comum chamar-se o primário de **entrada** e o secundário de **saída**, já que o autotransformador possui um só enrolamento.

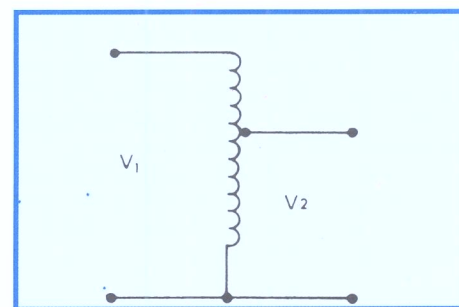



Figura 24-Autotransformador (simbologia).

O princípio de funcionamento do autotransformador é o mesmo que citamos para o transformador. De fato, vimos que, ao variar a corrente no primário, cria-se nela uma força contra-eletromotriz (força eletromotriz induzida de sinal contrário ao da aplicada), que é proporcional ao número de espiras. Assim, no transformador ideal, a **f. c. e. m.** é igual a tensão aplicada. Ora, se fizermos derivações no enrolamento primário, iremos encontrar força eletromotriz de indução, que é proporcional ao número de espiras da derivação. Assim, a tensão é modificada.

Por exemplo, se o primário tem 110 espiras, e a ele se aplicam 110 V, cada espira receberá 1 V e gerará uma força eletromotriz induzida de 1 V, também. Em conseqüência, se fizermos uma derivacão na 55ª espira, recolheremos a força eletromotriz de 55 V.

Convém notar que, se o autotransformador ideal tiver 220 espiras

e não houver carga ligada à saída, aplicando 110 V a 110ª espira, ficaremos na mesma situação descrita linhas atrás, ou seja, os 110 V geram tensão auto-induzida de 110 V e não haverá passagem de corrente pela entrada. Mas, se ligarmos carga à saída, essa carga ficará submetida à força contra-eletromotriz induzida de 220 V, porque, o enrolamento total tem 220 espiras, em nosso exemplo. Sendo assim, circulará corrente pela entrada, que é a de saída. No autotransformador real, além dessa corrente, teremos também a provocada pela perda no ferro e no cobre.

O cálculo do autotransformador é realizado da mesma maneira que mostramos para o transformador.

O autotransformador é largamente utilizado nos conhecidos **reguladores manuais de voltagem**, onde a tensão é aumentada ou diminuída, variando-se o número de espiras através de uma chave de um pólo e várias posições. Tanto faz variar o número de espiras na entrada como na saída do autotransformador. Na **figura 25**, mostramos seu desenho simbólico, ilustrando a primeira possibilidade, onde a variação da tensão de saída é conseguida variando-se o número de espiras do primário e, na **figura 26**, o do secundário.

Na saída do **regulador de voltagem**, liga-se um voltímetro, que deve sempre ser observado pelo usuário, a fim de evitar que a variação excessiva da tensão de entrada (que será transformada na mesma proporção) danifique o aparelho ligado à saída.

Na **figura 27**, mostramos um exemplo de regulador de voltagens, que era de uso muito comum, porém atualmente caiu em desuso.

Figura 25-Regulador manual de voltagens com chaveamento no primário.

Figura 26-Regulador manual de voltagens com chaveamento no secundário.

Figura 27-Aparência de um antigo regulador de voltagens comercial.

Curvas características de transistores

Introdução

Com esta lição especial, mostraremos as principais curvas de transistores enfatizando sua aplicação no projeto de amplificadores de AF.

Os manuais de transistores costumam apresentar uma série muito grande de curvas, que podem e devem ser aproveitadas; entretanto, nos limitaremos à apresentação das mais utilizadas na prática de desenvolvimento de amplificadores de baixa freqüência.

I - Parâmetros dos transistores

Os transistores apresentam **características variáveis** ou **parâmetros**, em grande número, devido ao fato de possuírem correntes de base e devido às diversas possibilidades de configuração. Apresentaremos exclusivamente os chamados parâmetros **h** ou **híbridos**, que são os de maior uso em baixa freqüência.

Os parâmetros híbridos são simbolizados pela letra **h** seguida de dois sub-índices númericos ou literais, sendo estes últimos os mais usados. Daremos o significado da primeira letra nas definições que se seguem. Quando às segundas, indicam o tipo de montagem (configuração), sendo **b** para base comum, **e** para emissor comum e **c** para coletor comum.

Os parâmetros híbridos são:

a) Impedância de entrada

A **impedância de entrada** de um transistor em ligação **emissor comum** é definida como a relação entre **variação da tensão base-emissor** (ΔV_{BE}) e a correspondente **variação da corrente de base** (Δi_b) para manter constante a tensão coletor-emissor.

A impedância de entrada costuma ser indicada por $\mathbf{h_{ie}}$. Nesta notação, a letra **i** indica entrada (do inglês input) e a segunda letra indica o tipo de ligação, sendo **b** para base comum, **e** para emissor e **c** para coletor comum.

Segundo essa notação e a definição dada antes, podemos escrever:

$$h_{ie} = \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta i_b} \quad \text{para } V_{CE} \text{ constante}$$

A impedância de entrada é medida em ohms.

b) Ganho reverso de tensão

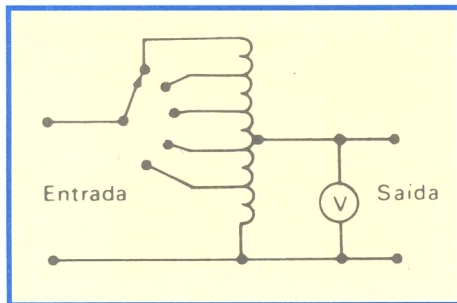
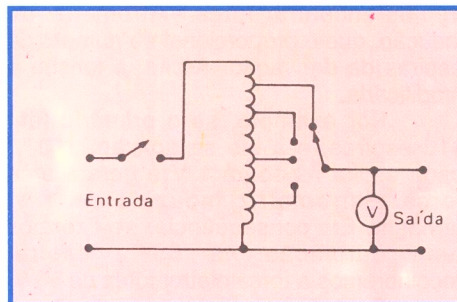
O **ganho reverso de tensão** é indicado por $\mathbf{h_{re}}$, onde **r** é a inicial de "reverse", palavra inglesa que significa reverso. O aluno também poderá encontrar o símbolo μ_{re} para o ganho reverso de tensão. Outro nome que se dá ao $\mathbf{h_{re}}$ é **relação de transferência inversa de tensão**.

O ganho reverso exprime a influência que a tensão de saída exerce sobre a tensão de entrada, quando a corrente de base é mantida constante. Podemos dizer, então, que o ganho reverso de tensão corresponde à relação entre a **variação da tensão base-emissor** e a necessária **variação da tensão coletor-emissor** para manter a corrente de base constante. Com a notação ΔV_{BE} para a variação da tensão base-emissor e ΔV_{CE} para a variação da tensão coletor-emissor, podemos escrever:

$$h_{re} = \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta V_{CE}} \quad \text{para } i_b \text{ constante}$$

Como trata de uma relação de duas grandezas de mesma espécie, ou seja, ambas tensões, o $\mathbf{h_{re}}$ é um número puro, isto é, não tem unidade de medida.

c) Ganho direto de corrente

O ganho direto de corrente corresponde à relação entre a **variação da corrente de coletor** e a necessária **variação da corrente de base** para manter a tensão coletor-emissor constante. A notação do ganho direto de corrente é $\mathbf{h_{fe}}$(onde **f** vem de "forward", que significa direto), β ou α_{fe}. De acordo com a definição, podemos escrever:

$$h_{fe} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_b} \text{ para } V_{CE} \text{ constante}$$

Quando a montagem é em **base comum**, o ganho direto de corrente costuma ser indicado por α.

O ganho direto também não tem unidades, por se tratar de divisão de grandezas semelhantes.

d) Admitância de saída

Inicialmente, devemos lembrar o aluno que se chama **admitância** ao inverso da impedância, ou seja, $y = 1/Z$ onde **y** é admitância e **Z** a impedância. Como Z é a relação entre tensão e corrente senoidais (lei de Ohm), isto é:

$$Z = \frac{V}{I}$$

segue-se que a admitância é:

$$Y = \frac{1}{\frac{V}{I}} = \frac{I}{V}$$

Quando a admitância é resistiva, ela recebe, também, o nome de **condutância**. Se for puramente reativa, receberá o nome de **susceptância**. No caso geral, admitância é a soma da condutância e da susceptância.

Dados estes esclarecimentos devemos deduzir que, para as freqüências de áudio, a admitância de saída dos transistores é predominantemente resistiva, donde se chama este 4º parâmetro de **condutância de saída**.

Isto posto, chamando a admitância do transistor de $\mathbf{h_{oe}}$, donde **o** é inicial de "output", que em inglês quer dizer saída, podemos defini-la como sendo a relação entre **variação da corrente de coletor** e a correspondente **variação da tensão coletor-emissor,** mantendo a corrente de base constante.

Assim,

$$h_{oe} = \frac{\Delta I_C}{\Delta V_{CE}} \text{ para } i_b \text{ constante}$$

Como se trata de relação entre corrente e tensão, a unidade de medida é o A/V (Ampère por Volt), que o aluno sabe chamar-se **mho**. Na Europa, a unidade de condutância, ou seja, o mho é chamado de **SIEMENS**.

II - Curvas características

Os parâmetros definidos no item anterior são representados por uma família de curvas, cujo aspecto é mostrado na **figura 1**. A partir delas, podemos encontrar o valor de cada parâmetro, para o ponto de trabalho que nos interessa.

Como o aluno percebe, essa família de curvas é apresentada em 4 regiões:

Em I está a família característica do coletor, ou seja, as curvas V_{CE} "versus" I_C, para i_b constante. A partir delas é possível calcular a admitância de saída.

Na região II estão representadas as curvas de corrente de coletor X corrente de base e podem ser traçadas facilmente, a partir das curvas da região I; por isso, é comum os manuais apresentarem apenas uma, que corresponde ao valor de V_{CE} típico (constante).

Na região III, temos as curvas de I_b em função de V_{BE} (I_b versus V_{BE}), para V_{CE} constante, que permitem determinar a impedância de entrada h_{ie}.

Nos manuais, é usual apresentar apenas uma delas, ou seja, a que corresponde ao ponto de trabalho típico, indicado pelo fabricante.

A região IV apresenta as curvas de V_{BE} em função de V_{CE}, para i_b constante, o que permite determinar o ganho reverso de tensão.

a) Utilização das Curvas

À guisa de ilustração, vamos utilizar as curvas do transistor para a determinação dos parâmetros. Suponhamos que as curvas apresentadas sejam aquelas mostradas na **figura 2**. O ponto de trabalho escolhido é:

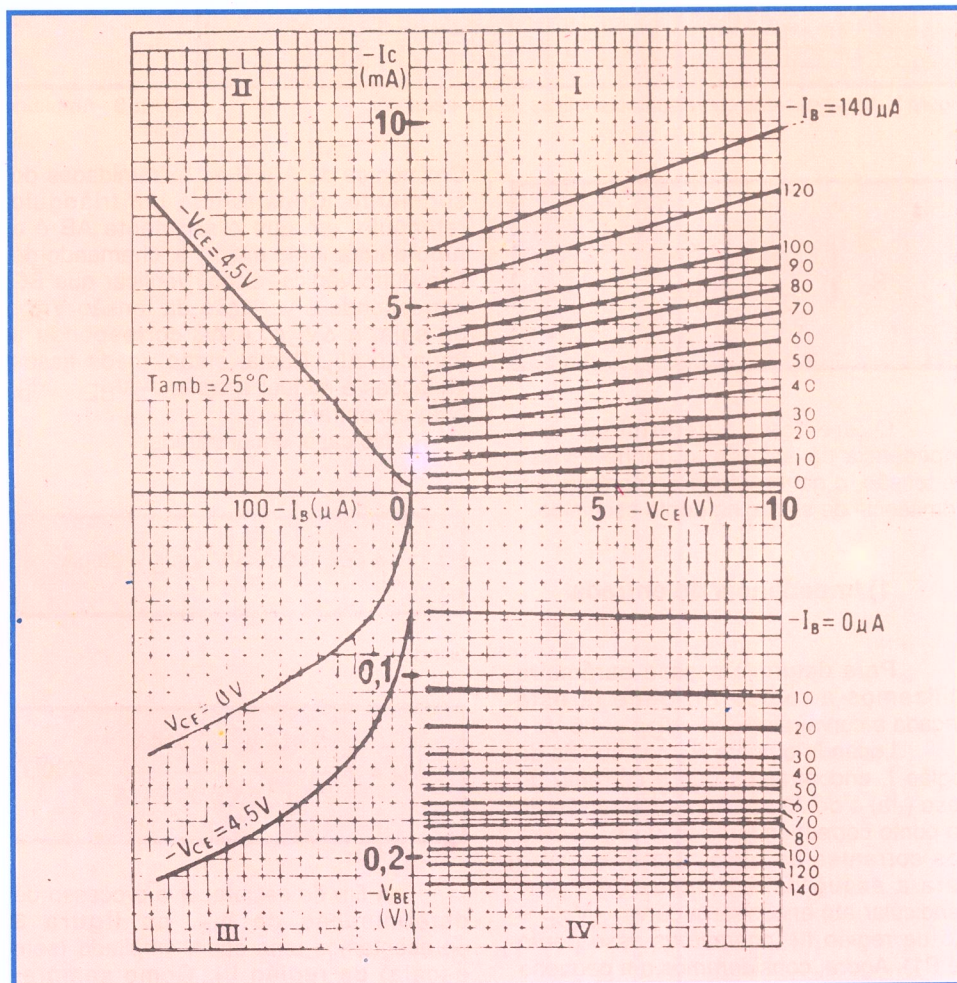



Figura 1 -Exemplo de uma família de curvas.

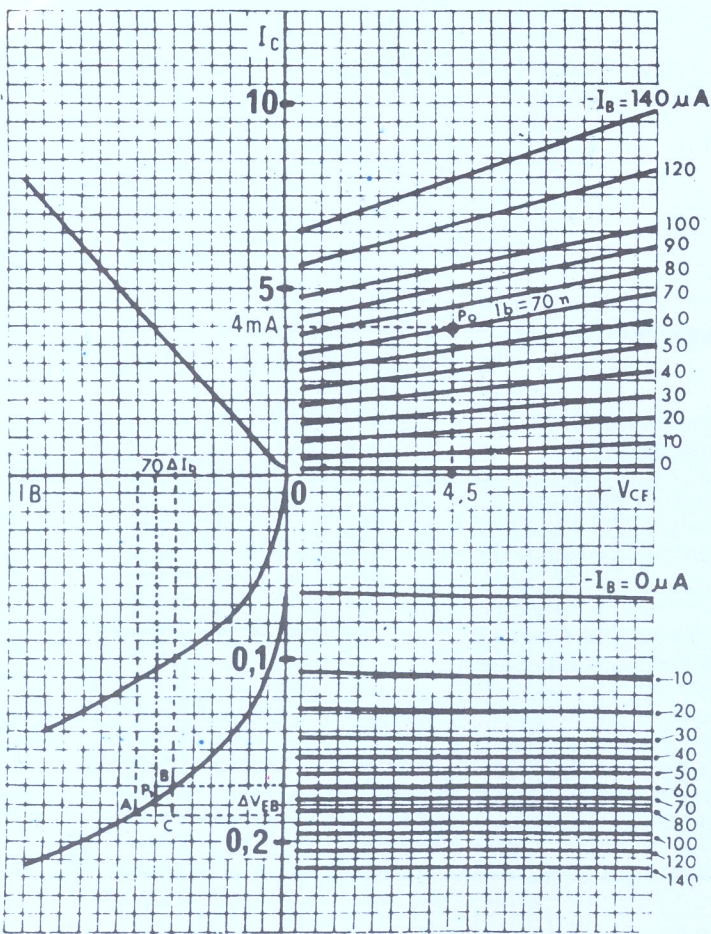



Figura 2 -Utilização das curvas características de um transistor.

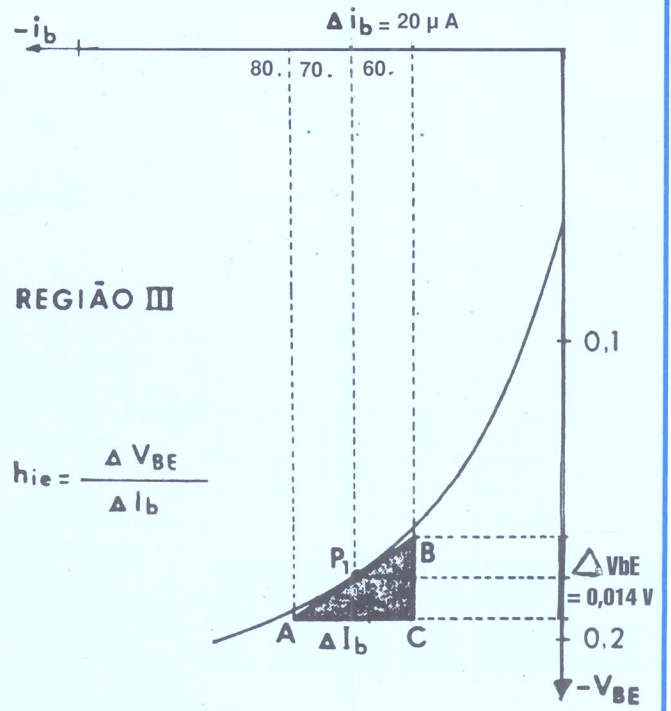



Figura 3 -Amplificação da região III da figura 2, para facilidade de análise.

$$P_O \begin{cases} -V_{CE} = 4{,}5\ V \\ -I_C = 4\ mA \end{cases}$$

Queremos determinar a impedância de entrada, o ganho reverso de tensão, o ganho direto de corrente e a admitância de saída, no ponto escolhido.

1) Impedância de entrada

Para determinar esse parâmetro utilizamos a região III, onde já está traçada a curva relativa a - V_{CE} = 4,5 V.

Locando o ponto P_O nas curvas da região I, encontramos que a corrente de base (-Ib) é de 70 μA. Agora, na região III, no ponto correspondente a 70 μA, no eixo das correntes de base, isto é, do zero para a esquerda, baixamos uma perpendicular até encontrar a curva - V_{CE} = 4,5 da região III (chamamos esse ponto de P1). Agora, consideramos um pequeno segmento de reta sobre a curva e de modo que o ponto P1 seja o centro.

Chamemos de A e B as extremidades do segmento. Construindo um triângulo retângulo, em que o segmente AB é a **hipotenusa** (lado maior) e, chamando de C o outro vértice, é fácil verificar que BC corresponde à variação da tensão V_{BE}, ou seja, a ΔV_{BE}, e AC corresponde à variação ΔI_b. Basta, então, medir essas variações e efetuar a conta : $\Delta V_{BE} \div \Delta I_b$, para encontrar h_{ie}.

No caso, encontramos:

$$\Delta V_{BE} = 0{,}014\ V \text{ e } \Delta I_b = 20\ \mu A$$

donde:

$$h_{ie} = \frac{0{,}014\ V}{20\ \mu\ A} = \frac{0{,}014\ V}{0{,}00002\ A} = 700\Omega$$

A fim de esclarecer o processo de determinação de h_{ie}, na **figura 3** apresentamos uma cópia ampliada (sem escala) da região III. Como sempre, quanto maior for o desenho, melhor será a precisão.

2) Ganho reverso de tensão

Para determinar esse parâmetro, utilizamos a região IV. Do eixo-V_{CE} traçamos uma perpendicular para baixo, até encontrar a curva da corrente de base que nos interessa; em nosso exemplo, é de 70 μA. No ponto de encontro, construímos um triângulo do mesmo modo como na determinação de h_{ie}, medimos as variações ΔV_{CE} e ΔV_{BE} e, fazendo a relação $\Delta V_{BE} \div \Delta V_{CE}$, temos o valor de h_{re}.

Quando as curvas das correntes de base são paralelas ao eixo de V_{CE}, como está acontecendo em nosso caso, não é possível determinar h_{re} graficamente. Para ilustrar o processo de determinação gráfica de h_{re}, na **figura 4** reproduzimos as curvas para um transistor hipotético e mostramos como se construirá o triângulo. Nesse exemplo, o valor do ganho reverso de tensão é:

$$h_{re} = \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta V_{CE}} = \frac{0{,}02}{2} = 0{,}01$$

Como afirmamos, não há unidade.

3) Ganho direto de corrente

Para determinar o ganho de corrente, podemos utilizar tanto a região I como a II. Vamos utilizar a II.

Em primeiro lugar, locamos o ponto de trabalho sobre a curva correspondente a - 4,5 V ($-V_{CE}$). Basta, para isso, levantar uma perpendicular de $-I_b$ = 70 μA (ou de $-I_c$ = 4 mA), até encontrar a curva. Agora, tendo esse ponto como centro da hipotenusa, construímos o triângulo ABC. O lado AC corresponde à variação ΔI_b e o lado BC à variação ΔI_c; logo, fazendo a divisão de ΔI_c por ΔI_b, teremos o valor de h_{fe}.

Em nossa figura, encontramos:

$$\Delta I_c = 4{,}5 - 3{,}5 = 1 \text{ mA}$$
$$\Delta I_b = 80 - 60 = 20 \ \mu\text{A}$$

donde:

$$h_{fe} = \frac{1 \text{ mA}}{20 \ \mu\text{A}} = \frac{1\,000 \ \mu\text{A}}{20 \ \mu\text{A}} = 50$$

Como é óbvio, h_{fe} não tem unidades.

O aluno deve ter notado que, sempre que necessário, transformamos as unidades para obtermos o resultado correto.

Assim, na determinação de h_{fE}, transformamos microampères em ampères, porque nos interessa chegar ao valor da impedância de entrada em ohms. Na determinação de h_{fe} transformamos mA em μA, para que as unidades, tanto do numerador como do denominador, ficassem iguais. Observe que também poderíamos transformar μA em mA, e o resultado seria o mesmo.

Na **figura 5**, reproduzimos a região II ampliada, mostrando a construção feita, para determinar h_{fe}.

4) Condutância de saída

A admitância ou condutância de saída será determinada pela utilização das curvas da região I. Para tanto, tendo o ponto de trabalho P_o ($-V_{CE}$ = 4,5 V; $-I_b$ = 70 μA) como centro da hipotenusa, sobre $-I_b$ = 70 μA construímos o triângulo ABC. O lado BC corresponde à variação da corrente de coletor e o lado AC, à variação da tensão do coletor, logo, dividindo o último pelo primeiro teremos o valor de h_{oe}.

Da figura 2 resulta:

$$\Delta I_c = 4{,}5 - 3{,}5 = 1 \text{ mA}$$
$$\Delta V_{CE} = 7{,}5 - 1{,}5 = 6\text{V}$$

Logo:

$$h_{oe} = \frac{1 \text{ mA}}{6\text{V}} = \frac{1000 \ \mu\text{A}}{6\text{V}} = 166 \ \mu\text{A/V} \text{ ou } 166 \ \mu \text{ mho}$$

A título de ilustração do modo de determinar o valor de h_{oe}, apresentamos, na **figura 6**, a região I aumentada.

b) Aplicação dos parâmetros

Inicialmente, devemos esclarecer que os parâmetros do transistor foram determinados para ligação em **emissor comum.** Se a montagem for em base comum, ou coletor comum, seus valores serão diferentes. Para achá-los, graficamente, é necessário dispor da família de curvas correspondentes à montagem. Entretanto, esse trabalho pode ser dispensado utilizando as fórmulas de conversão, que apresentamos na **tabela A**. Estas fórmulas permitem encontrar os valores dos parâmetros em base comum e coletor comum, conhecendo-se seus valores para emissor comum. Conhecendo-se seus valores em base comum ou coletor comum, pode-se convertê-los para emissor comum, através de transformações matemáticas das fórmulas expostas.

Exemplo:

Como aplicação das fórmulas da tabela A, vamos encontrar os valores dos parâmetros **h** para a montagem **base comum**, conhecendo os parâmetros em montagem emissor comum.

Seja:

$$h_{ie} = 700\Omega$$
$$h_{re} = 0{,}0006$$
$$h_{fe} = 50$$
$$h_{oe} = 166 \ \mu\text{A/V}$$

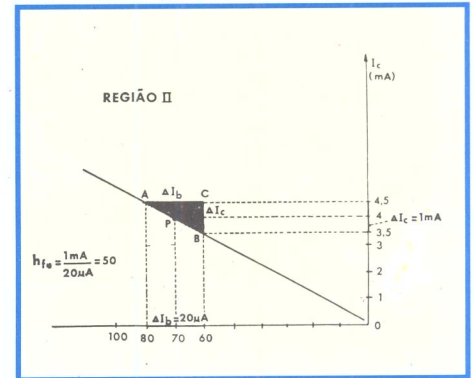



Figura 5 -Detalhe ampliado da região II.

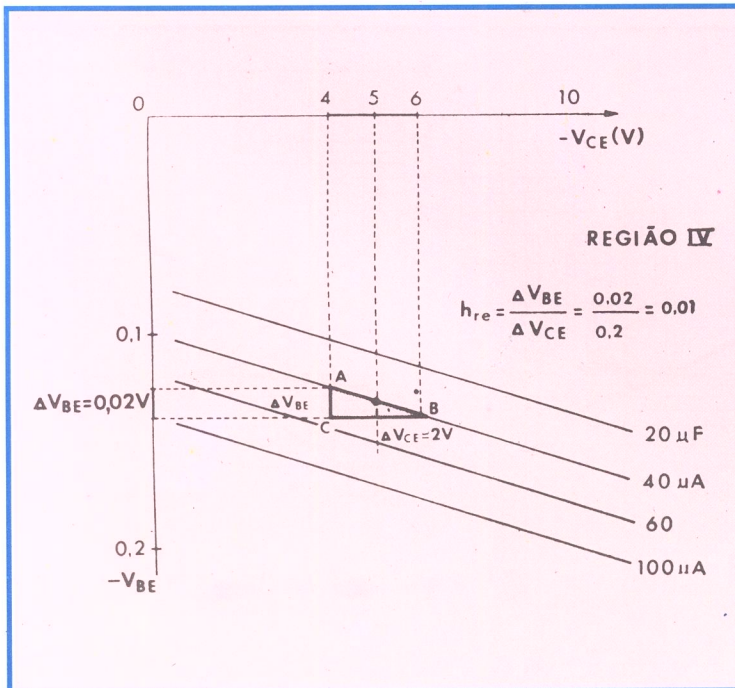



Figura 4 -Curvas hipotéticas de um transistor para ilustrar a determinação de h_{re}.

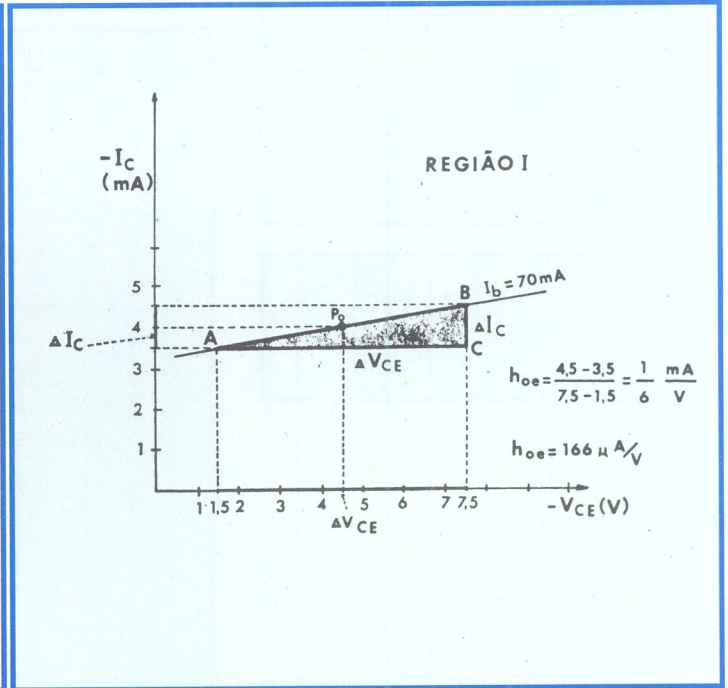



Figura 6 -Ampliação da região I.

PARÂMETROS		
Montagem Emissor Comum	Montagem Base Comum	Montagem Coletor Comum
h_{ie}	$h_{ib} = \frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}}$	$h_{ic} = h_{ie}$
h_{re}	$h_{rb} = \frac{h_{ie} h_{oe}}{1 + h_{fe}} - h_{re}$	$h_{rc} = 1 - h_{re}$
h_{fc}	$h_{fb} = -\frac{h_{fe}}{1 + h_{fc}}$	$h_{fc} = -(1 + h_{fe})$
h_{oe}	$h_{ob} = \frac{h_{oe}}{1 + h_{fe}}$	$h_{oc} = h_{oe}$
	TABELA A	

TABELA A

Solução:

Utilizando as fórmulas da segunda coluna da tabela, teremos:

$$1^{\underline{o}})\ h_{ib} = \frac{h_{ie}}{1 + hfe} = \frac{700}{1 + 50} = \frac{700}{51} = 13{,}7\ \Omega$$

$$2^{\underline{o}})\ h_{rb}\ \frac{h_{ie}\, h_{oe}}{1 + h_{fe}} - h_{re} = \frac{700\Omega \times 166\mu A/V}{1 + 50} - 0{,}0006$$

Como temos h_{ie} em ohms e h_{oe} em µA/V devemos transformar o valor de h_{oe} em ℧, ou seja, $\frac{1}{\Omega}$. Vem:

166 µ mho = 166 ÷ 1 000 000 mho = = 0,000166 mho

Agora, substituindo esse valor na expressão de h_{rb}, teremos:

$$h_{rb} = \frac{700 \times 0{,}000\,166}{51} - 0{,}0006 =$$

$$h_{rb} = \frac{0{,}1162}{51} - 0{,}0006 =$$

$$h_{rb} = 0{,}002278 - 0{,}0006 = 0{,}001678$$

$$3^{\underline{o}})\ h_{fb} = -\frac{h_{fe}}{1 + h_{fe}} = -\frac{50}{1+50} = -\frac{50}{51}$$

$$h_{fb} = -0{,}98$$

$$4^{\underline{o}})\ h_{ob} = \frac{h_{oe}}{1 + h_{fe}} = \frac{166}{1 + 50} = \frac{166}{51} =$$

$$h_{ob} = 3{,}25\ \mu\text{ mho}$$

Estes são, portanto, os valores dos parâmetros híbridos na montagem em base comum.

O aluno viu que os parâmetros são determinados para o ponto de funcionamento escolhido. Se mudarmos o ponto, deveremos recalcular os parâmetros. Para evitar esse trabalho, os bons manuais costumam trazer os valores calculados para um ponto de trabalho e curvas que permitem converter esses valores para qualquer outro ponto. Um exemplo dessas curvas é o que apresentamos na **figura 7**. Estas curvas se referem ao transistor OC75 na montagem emissor comum, e foram construídas tendo como ponto de trabalho $-V_{CE} = 2$ V e $-I_C = 3$mA. Para esse ponto o fabricante determinou:

$h_{ie}\ (h_{11e}) = 1{,}3K\Omega$
$h_{re}\ (h_{12e}) = 0{,}0008$
$h_{fe}\ (h_{21e}) = 90$
$h_{oe}\ (h_{22e}) = 125\ \mu$ mho

Como aplicação dessas curvas vamos supor que desejamos conhecer os parâmetros **h** para o ponto de trabalho $-V_{CE} = 5$ V e $-I_C = 5$ mA.

Inicialmente, nos pontos dos dois gráficos, correspondentes ao novo ponto de trabalho, ou seja, $-V_{CE} = 5$ V $-I_C = 5$ mA, traçamos duas retas (uma para cada família de curvas), perpendiculares aos eixos de tensão e de corrente, respectivamente. Onde cada reta corta as curvas, teremos os fatores de correção. Agora, multiplicamos esses fatores entre si, e o resultado multiplicamos pelo valor correspondente de **h**, dado pelo fabricante.

Iniciemos a solução do nosso problema, encontrando o valor de h_{ie} (impedância de entrada).

Verificamos que a reta correspondente a $-V_{CE} = 5$ V corta a curva h_{11e} no ponto P_{11}. Desse ponto, traçamos uma reta paralela ao eixo de V_{CE}, até encontrar o eixo dos fatores de correção. Lemos esse valor. Em nosso caso é aproximadamente 1,1. Agora, fazemos a mesma construção no gráfico da família de curvas em função da corrente. Encontramos que o fator de correção é 0,7. A correção total será, portanto:

$$1{,}1 \times 0{,}7 = 0{,}77$$

Conseqüentemente, no ponto $-V_{CE} = 5$ V e - Ic = 5 mA, o valor da impedância de entrada será:

$$h_{ie} = 1\,300\Omega \times 0{,}77 = 1\,001\Omega$$

ou, aproximadamente: 1 KΩ.

De igual modo se determinarão os outros parâmetros. Vamos encontrar apenas mais um, o h_{fe} (h_{21e}), para consolidar o método. Os outros dois o aluno poderá determinar como exercício.

Para encontrar os fatores de correção para o h_{fe}, verificamos que a reta traçada por $-V_{CE} = 5$ V corta a curva h_{21e} no ponto P_{22}. Projetando esse ponto sobre o eixo do fator de correção, lemos o valor aproximado de 1,15.

Por outro lado, a reta traçada pelo ponto $-I_C = 5$ mA corta a curva h_{21e} no ponto P''_{22}. Esse ponto, projetado no eixo do fator de correção, cairá sobre o número 1; logo, esse é o fator.

A correção total será de:

$$1{,}15 \times 1 = 1{,}15$$

Logo, o valor de h_{fe} no ponto $-V_{CE} = 5$ V e $-I_C = 5$ mA será de:

$$h_{fe} = 90 \times 1{,}15 = 103{,}5$$

c) **Amplificação de tensão de pequenos sinais**

Quando se trata de amplificar sinais de pequena amplitude, é mais interessante utilizar as expressões

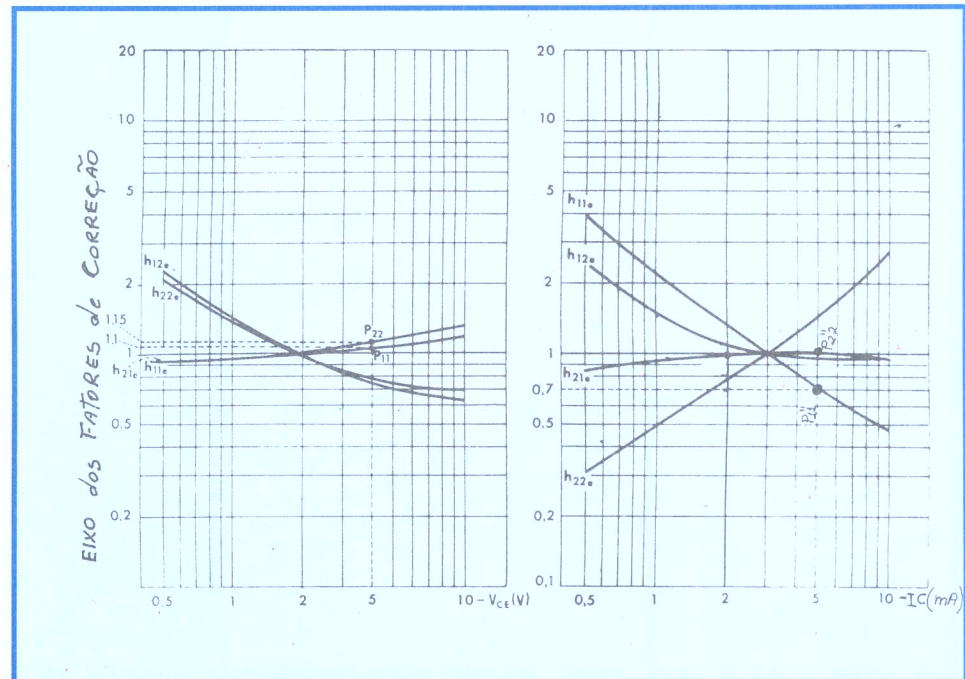



Figura 7 -Curvas características do transistor OC75.

matemáticas. Para sinais de grande amplitude essas expressões perdem sua validade e, então, apela-se para as curvas características.

O circuito básico de um amplificador de tensão transistorizado na ligação emissor comum, que é mais utilizada na prática, é mostrado na **figura 8**, para o transistor NPN. Se se tratar de transistor PNP, bastará inverter as polaridades da bateria; conseqüentemente, o sentido das correntes se inverterá, ficando adequado ao transistor PNP.

Como se nota na figura, pelo coletor circula a corrente I_C, pela base a i_b e, pelo emissor, a corrente i_e. Ambas as correntes estão representadas no sentido **convencional.** A corrente de emissor é igual à soma da corrente de coletor com a de base. Como esta última é, geralmente, muito pequena em relação à corrente de coletor, pode-se, sem erro apreciável, considerar a corrente de emissor igual à corrente de coletor.

A tensão V_{CE} é aquela existente entre coletor e emissor. O potencial mais alto no caso do transistor NPN, é o do coletor, ou seja, o coletor é positivo em relação ao emissor.

A tensão V_{BE} é aquela que existe entre a base e o emissor. Para o transistor NPN,a base é positiva em relação ao emissor. A tensão V_{BE} é sempre baixa, ou seja, de alguns décimos de Volt. Para os transistores de germânio, o valor típico é 0,2 V e, para os de silício 0,6 V.

O resistor R_L é o resistor de carga do transistor. O capacitor C_C é para o acoplamento com um transdutor ou com outro estágio amplificador. Para generalizar a carga, desenhamos em tracejado uma impedância **Z.** R_e é o resistor de emissor e C_e é o capacitor de passagem para as correntes alternadas. R_1 e R_2 são as resistências necessárias à estabilização do ponto de trabalho.

A tensão de entrada e_e é aplicada na base do transistor através do capacitor de acoplamento C. Essa tensão pode ser o sinal de um fonocaptador, microfone, detetor, etc., e, para generalizar sua procedência, podemos atribuí-la a um gerador de tensão alternada, de resistência interna R_g, como desenhamos em tracejado.

A fonte de tensão é V_{CC}, que pode ser pilha, bateria, tensão retificada da rede, etc.

Para o circuito de figura 8, vamos definir o ganho de corrente como a relação entre a corrente de saída e a de entrada. Chamando de i_1 e i_2, respectivamente, essas correntes, podemos escrever:

$$G_i = \frac{i_2}{i_1}$$

onde, G_i é o ganho de corrente.

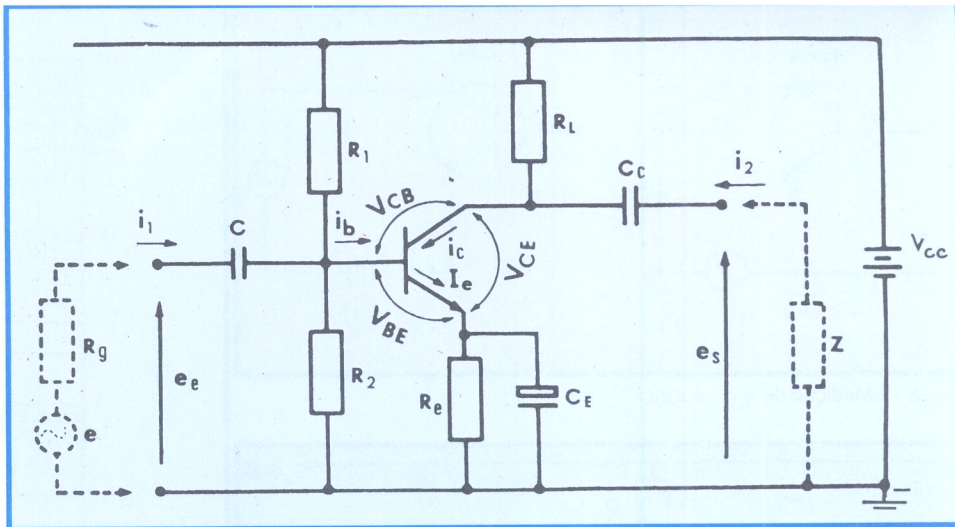



Figura 8 -Circuito básico em emissor-comum.

Analogamente, sendo e_S, a tensão de saída e, e_e a tensão de entrada, o ganho de tensão do circuito, que chamaremos de G_V, será a relação entre a tensão de saída e a de entrada, ou seja:

$$G_V = \frac{e_S}{e_e}$$

O ganho de potência é o produto do ganho de tensão pelo de corrente. Chamando-o de Gp, teremos:

$$Gp = G_V \cdot G_i$$

Um detalhe importantíssimo, no amplificador usando transistor é a sua estabilidade térmica. No circuito da figura 8, essa estabilidade é proporcionada pelos resistores R_1, R_2 e R_e.

Vamos, agora, dedicar um pouco mais de espaço ao problema da estabilidade dos transistores.

d) Estabilização da polaridade

Simplificadamente, podemos considerar o transistor como formado por dois diodos segundo a **figura 9**. O diodo emissor-base é polarizado diretamente, isto é, no sentido da condução, ou seja, o

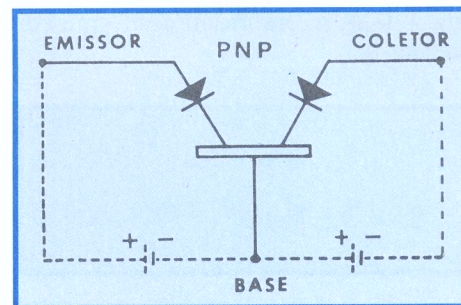



Figura 9 -Representação dos diodos internos ao transistor.

ânodo positivamente e o cátodo negativamente. O diodo coletor-base é polarizado no sentido inverso.

Em um diodo **ideal**, a corrente flui somente quando a polarização é direta, ou seja, ânodo positivo e cátodo negativo. Na situação de polaridade inversa, a corrente é nula. Nos diodos **reais**, mesmo na condição de polarização inversa, há passagem de uma pequena corrente denominada de **corrente de fuga**, isto porque a resistência inversa, ou seja, contrária ao sentido de condução, não é infinita. Como primeira decorrência desse fato, podemos concluir que entre o diodo coletor-base de um transistor existirá sempre uma corrente de fuga. Note que entre emissor e base não há corrente de fuga, porque essa junção está polarizada no sentido da condução.

Uma segunda observação importante, que se pode fazer, é que a corrente de fuga aumenta com a temperatura.

Considerando-se o transistor, define-se a corrente de fuga $\mathbf{I_{CBO}}$ como aquela existente **entre coletor e base, estando o emissor aberto**, ou seja, desligado. Essa corrente também costuma ser indicada por $\mathbf{I_{CO}}$. Da mesma maneira, define-se a corrente de fuga I_{CEO} como a corrente inversa que flui de **coletor para emissor**, **quando a base está sem ligação,** ou seja, aberta; essa corrente também é indicada por $\mathbf{I_{CO}}'$. Essas correntes, como afirmamos, crescem com a temperatura; por isso, nos manuais, elas são indicadas para uma da temperatura, geralmente 25°C. Na **figura 10**, indicamos como se medem $\mathbf{I_{CBO}}$ e $\mathbf{I_{CEO}}$.

A corrente de fuga dos transistores destinados a amplificar pequenos sinais é baixa, ou seja, da ordem de alguns microampères. Nos transistores de potência atinge alguns miliampères.

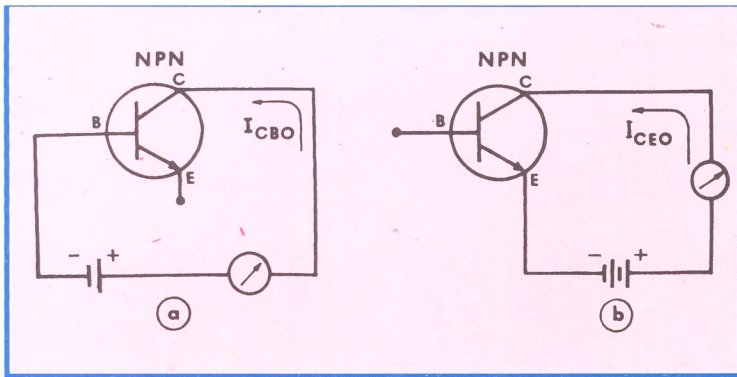



Figura 10-Medição de I_{CBO} e I_{CEO}.

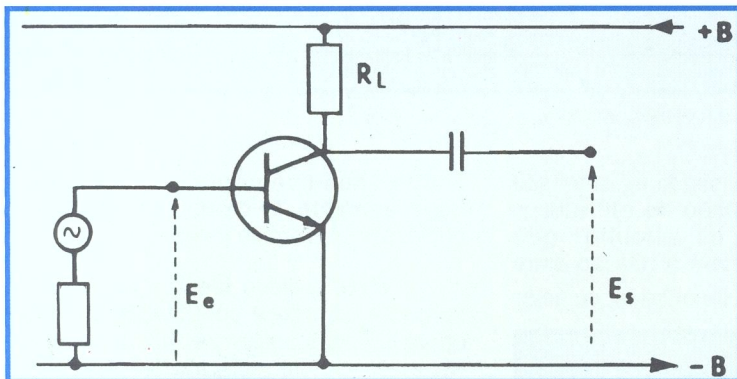



Figura 12-Circuito para análise.

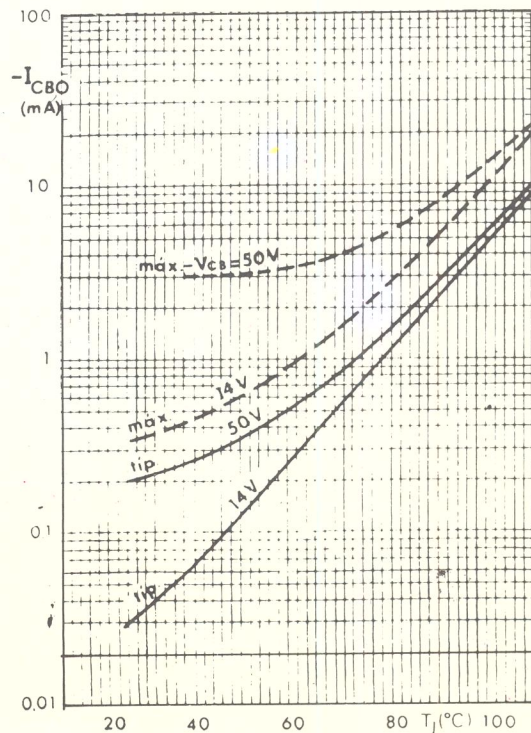



Figura 11-Gráfico de I_{CBO} x temperatura.

Por exemplo, o transistor OC75 (para pequenos sinais) apresenta I_{CBO} de 4,5 μA com - V_{CE} = 4,5 V e temperatura de 25°C. Nas mesmas condições (- V_{CE} = 4,5V), o I_{CEO} é de 350 μA (observe a diferença com I_{CBO}). Já o transistor ADY26 (média potência), na temperatura de 20°C, com - V_{CE} de 80 V, tem corrente I_{CBO} de 0,5 mA (500 μA) e I_{CEO} de 12,5 mA.

Essas correntes aumentam com a temperatura e podem atingir valores tão altos que levam o transistor à destruição.

Geralmente, os manuais costumam trazer gráficos, mostrando a variação da corrente de fuga com a temperatura, para uma estipulada tensão V_{CB} ou V_{CE}. Na **figura 11,** apresentamos um gráfico típico.

De um modo geral, pode-se admitir que a corrente de fuga duplica a cada variação (positiva) de 10°C de temperatura, nos transistores de germânio, e a cada 5,5°C, nos transistores de silício.

Deste modo, para o transistor de germânio, que apresenta, por exemplo, 10 μA de I_{CBO} a 20°C, quando a temperatura passa a 60°C a corrente I_{CBO} passa a:

20° I_{CBO} 10 μA
30° I_{CBO} 2 x 10 μA = 20 μA
40° I_{CBO} 2 x 2 x 10 μA = 40 μA
50° I_{CBO} 2 x 2 x 2 x 10 μA = 80 μA
60° I_{CBO} 2 x 2 x 2 x 2 x 10 μA = 160 μA

Observando esses números, é fácil concluir que, se o ponto de trabalho tivesse sido escolhido sobre a curva de i_b = 60 μA, com a mudança de temperatura ele estaria em 120 μA e **a distorção seria intolerável.**

A corrente de fuga I_{CEO} é, aproximadamente, igual h_{fe} (β) vezes a corrente I_{CBO}, nas mesmas condições de tensão e temperatura. Isto pode ser explicado observando que, na condição de base aberta, a corrente de fuga tem que atravessar a junção base-emissor polarizada no sentido direto e a junção base-coletor polarizada no sentido inverso. Essa corrente, atravessando a base, atua como sinal e é amplificada pelo transistor. Daí concluir-se que o transistor montado em base comum é mais estável em relação às mudanças de temperatura do que o transistor montado em emissor comum.

A corrente de coletor, na montagem base comum, é a soma de $\alpha I_e + I_{CBO}$ e, na montagem emissor comum, é:

$$\beta I_b + I_{CEO}$$

$$\text{ou: } \beta I_b + \beta I_{CBO} = \beta (I_b + I_{CBO})$$

Se não forem tomadas medidas especiais, que visem a estabilizar a corrente de fuga I_{CEO} ela crescerá indefinidamente e levará o transistor à ruina. De fato, suponhamos que se efetue uma montagem, como sugerimos na **figura 12**, onde não há vinculação externa da corrente de base com os demais terminais do transistor.

Admitamos que o transistor tenha I_{CBO} de 20 μA e β = 100, a 25°C. Nestas condições, ao ligarmos o circuito, o I_{CEO} será de 20 x 100 = 2.000 μA ou 0,002 mA. Essa corrente aquecerá a junção coletor-base e, conseqüentemente, haverá aumento de corrente. Esse aumento será amplificado o que aumentará ainda mais a temperatura da junção coletor-base. Como a cada aumento corresponde um outro maior, haverá uma situação em que o transistor se deteriora. A esse fenômeno dá-se o nome de **realimentação térmica positiva, agitação térmica, corrida térmica** ou **efeito avalanche**.

Os transistores de silício apresentam corrente de fuga muito menor que a dos de germânio, cerca de 100 a 1.000 vezes menor, daí resultando a grande superioridade desses dispositivos sobre os de germânio.

De qualquer modo, para se utilizar confiavelmente um transistor é necessário prover sua estabilização térmica. Isto se faz evitando que a polarização emissor-base varie em conseqüência das mudanças de I_{CBO}.

Existem várias maneiras de estabilizar a polarização, como mostraremos em uma próxima lição especial.